

UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON

- MEDECINE -

U. E. R. SUD-OUEST

Année 1977 - N° 481

**LE BILAN HYDRIQUE AU COURS
DE L'EXERCICE MUSCULAIRE PROLONGE**

THESE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON

et soutenue publiquement le 26 Octobre 1977

pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

par

Bruno MELIN

Ancien Élève de l'École du Service de Santé des Armées de Lyon

né le 23 Février 1951

à CHATEAU-GONTIER (Mayenne)

99

UNIVERSITE CLAUDE-BERNARD - LYON
- MEDECINE -
U. E. R. SUD-OUEST

Année 1977 - N° 481

**LE BILAN HYDRIQUE AU COURS
DE L'EXERCICE MUSCULAIRE PROLONGE**

THESE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON

et soutenue publiquement le 26 Octobre 1977

pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

par

Bruno MELIN

Ancien Élève de l'École du Service de Santé des Armées de Lyon

né le 23 Février 1951

à CHATEAU-GONTIER (Mayenne)

UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD - LYON

- MÉDECINE -

U. F. R. SUD-OUEST

Année 1971 - 1972

LE BILAN HYDRIQUE AU COURS
DE L'EXERCICE MUSCULAIRE PROLONGÉ



THÈSE

présentée

à l'Université Claude-Bernard - LYON

et soumise publiquement le 25 Octobre 1971

pour obtenir le grade de Docteur en Médecine

par

Brice MELIN

né le 23 Février 1951

à CHATEAU-GONTIER (Mayenne)

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD - LYON I

Président : Mr le Professeur D. GERMAIN

Premier Vice-Président : Mr le Professeur EL BAZ

Deuxième Vice-Président : Mr B. ROUSSET, chercheur

Troisième Vice-Président : Mr R. LOPEZ, étudiant

Secrétaire Général de l'Université : Mr J. RAMBAUD, Administrateur civil

Unités d'Enseignement et de Recherche (U.E.R.)

U.E.R. de Médecine GRANGE-BLANCHE : Mr le Docteur B. SALLE, Maître de Conférences

U.E.R. de Médecine ALEXIS CARREL : Mr le Professeur R. MORNEX

U.E.R. de Médecine LYON NORD : Mr le Docteur J.P. NEIDHARDT, Maître de Conférences

U.E.R. de Médecine SUD OUEST : Mr le Professeur J. NORMAND

U.E.R. des Sciences Pharmaceutiques : Mr le Professeur C.A. BIZOLLON

U.E.R. des Techniques de Réadaptation : Mr A. MORGON, Maître de Conférences

U.E.R. de Biologie Humaine : Mr J.P. REVILLARD, Maître de Conférences

U.E.R. d'Education Physique et Sportive : Mr A. MILLON, Professeur EPS

U.E.R. des Sciences Odontologiques : Mr le Docteur R. VINCENT

U.E.R. de Mathématiques : Mr le Professeur E. COMBET

U.E.R. de Physique : Mr le Professeur J. DELMAU

U.E.R. de Chimie Biochimie : Mr le Professeur J. HUET

U.E.R. des Sciences de la Nature : Mr le Professeur R. GINET

U.E.R. des Sciences Sciences Physiologiques : Mle le Professeur J.F. WORBE

U.E.R. de Physique Nucléaire : Mr le Professeur M. GUSAKOW

I.U.T. 1 : Mr le Professeur B. POUYET

I.U.T. 2 : Mr J. GALLET, Directeur ENSAM

Observatoire de Lyon : Mr G. MONNET, Astronome Adjoint

U.E.R. de Mécanique : Mle le Professeur G. COMTE-BELLOT

A MA FIANCÉE

Donne de ta part à mon amour les assurances de mon affection
et de mon dévouement. Je t'aime de tout mon cœur.

A MON PÈRE

Je vous aime de tout mon cœur et de toute mon âme.
C'est ma plus grande joie et mon plus grand honneur
et mon plus grand bonheur.

A TOUS SA FAMILLE

A JEAN PAUL SCIACCH

C'est avec un grand plaisir que j'ai vu naître
dans la vie la principale réalisation.

EXAMINATEURS :

Président : Professeur J.F. CIER

Assesseurs : Professeur R. FLANDROIS

Professeur Agrégé G. GHARIB

Professeur Agrégé R. LACOUR

Professeur Agrégé R. HENANE

A MA FIANCEE

dont le soutien moral et la collaboration technique
m'ont permis de mener à bien ce travail.
Avec tout mon amour.

A MES PARENTS

Je voudrais avec ce travail leur exprimer
toute ma reconnaissance
et les assurer de ma profonde affection.

A TOUTE MA FAMILLE

A JEAN PAUL ECLACHE

Il m'a donné comme sujet de thèse un travail
dont il est le principal réalisateur.
Ses conseils judicieux, la clarté de son raisonnement
et sa gentillesse m'ont permis de découvrir
l'aspect passionnant de la physiologie sportive.
Son aide constante m'a permis d'accomplir ce travail
et je ne sais comment lui exprimer ma reconnaissance.

AUX 14 SUJETS VOLONTAIRES POUR CES EXPERIENCES

dont seules la motivation et la générosité dans l'effort
pouvaient permettre de garantir la réussite
de ce type de travail.

Je suis heureux de leur adresser
tous mes remerciements.

A TOUS MES CAMARADES DE L'EQUIPE DE RUGBY DE L'ESSA

Et en particulier Patrick HUGÉUX, Jacques AUCLAIR, Alain JOAS et Pierre MEFFRE
avec lesquels j'ai connu bien des joies
sur les terrains de sport.

A TOUS MES AMIS

Je dédie ce travail.

A MONSIEUR LE MEDECIN GENERAL THALABARD

Ophtalmologiste des Hopitaux des Armées

Commandant l'Ecole du Service de Santé des Armées de LYON

A MONSIEUR LE MEDECIN EN CHEF SEPETJIAN

Spécialiste des maladies du coeur et des vaisseaux

Biologiste du Service de Santé des Armées

Commandant en Second de l'Ecole du Service de Santé
des Armées de LYON

Nous avons apprécié pendant plusieurs années
sa compétence et sa gentillesse.

En témoignage de l'estime que nous lui portons.

A NOTRE PRESIDENT DE THESE

MONSIEUR LE PROFESSEUR J.F. CIER

Nous ressentons comme un grand honneur
d'être jugé par lui.

Nous l'assurons de notre profond respect.

A NOS JUGES

MONSIEUR LE PROFESSEUR R. FLANDROIS

Nous le remercions de s'être intéressé à ce travail
et d'avoir accepté de le juger.

Qu'il soit assuré de notre sincère considération.

MONSIEUR LE DOCTEUR C. GHARIB , MAITRE DE CONFERENCES AGREGÉ

Nous le remercions d'avoir accepté avec gentillesse
de nous aider à réaliser ce travail.

nous lui exprimons toute notre reconnaissance.

MONSIEUR LE DOCTEUR R. LACOUR , MAITRE DE CONFERENCES AGREGÉ

Il a bien voulu participer au jury de cette thèse.

Avec toute notre gratitude.

MONSIEUR LE MEDECIN EN CHEF R. HENANE , MAITRE DE RECHERCHE DU SERVICE DE SANTE
DES ARMEES

Il nous a aimablement accueilli dans son laboratoire
de Physiologie et a tout fait pour nous permettre
de mener à bien ce travail.

Nous lui exprimons nos respectueux remerciements.

Nous remercions vivement :

MONSIEUR LE MEDECIN EN CHEF HENANE qui a mis à notre disposition tout le matériel du CRSSA nécessaire au bon déroulement des expériences, ainsi que Madame HANNIQUET et Mademoiselle VIRET pour leur collaboration technique efficace.

MADAME QUARD dont la participation aux expériences et à l'exploitation des résultats a contribué grandement à l'élaboration de ce travail. Nous avons pu apprécier sa gentillesse et nous lui exprimons toute notre reconnaissance.

MONSIEUR LE PROFESSEUR BIZOLLON et son équipe pour le dosage de l'aldostérone plasmatique.

MONSIEUR LE PROFESSEUR AGREGÉ GHARIB et son équipe, en particulier Mademoiselle VINCENT et le Docteur ANNAT pour le dosage de l'activité rénine plasmatique, Madame ALLEVARD-BURGUBURU et Mademoiselle GEELLEN pour le dosage de l'activité antidiurétique.

MONSIEUR LE PROFESSEUR AGREGÉ LEGROS et toute son équipe pour le dosage des neurophysines.

MONSIEUR LE PHARMACIEN EN CHEF PARADO et le personnel du laboratoire de Pharmacie de l'H.I.A. Desgenettes pour la mesure des ionogrammes sanguins et urinaires.

Ce travail a pu être réalisé en partie grâce à une aide de la D.G.R.S.T.
n° 77 . 7 . 0823.

TABLE DES MATIERES

	Pages
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I - RAPPELS CONCERNANT LA REPARTITION ET LA CINETIQUE DE L'EAU DANS L'ORGANISME	2
I - La répartition de l'eau	2
II - La cinétique de l'eau et les facteurs hormonaux intervenant dans sa régulation	2
1) Les mouvements hydriques	2
a) les mouvements entre les différents compartiments	2
b) les échanges hydriques de l'organisme avec le milieu extérieur	2
2) Les facteurs hormonaux intervenant dans sa régulation	3
a) l'hormone antidiurétique	3
b) le cortisol	3
c) l'aldostérone	3
CHAPITRE II - TECHNIQUES EXPERIMENTALES	5
I - Paramètres étudiés	5
II - Techniques de recueil des différents paramètres	7
1) Le cadre expérimental	7
2) Les paramètres respiratoires	7
a) un ensemble masque soupape	7
b) un circuit expiratoire	7
c) la soupape inspiratoire	9
3) La fréquence cardiaque	9
4) Les températures	9
5) La mesure des paramètres biologiques sanguins	9
a) le ionogramme sanguin	9
b) l'acide lactique sanguin	10
c) les hormones plasmatiques	10
6) Les paramètres biologiques urinaires	10
a) le ionogramme urinaire	10
b) l'ADH urinaire	10
III - Sujets d'expériences	11
IV - Expérimentations	12
1) Expériences préliminaires	12
2) Expériences proprement dites	13
a) déroulement d'une expérience type	13
b) déroulement des séries expérimentales	14

V - Exploitation des résultats	16
1) Exploitation des enregistrements	16
2) Exploitation des résultats numériques	16
a) la consommation d'oxygène	16
b) le volume plasmatique	16
c) les clearances	19
d) le bilan hydrique	19
3) Classification des sujets en fonction de leur endurance	22
CHAPITRE III - RESULTATS	23
I - Etude comparative entre 3 groupes de sujets d'endurance différente sous une même ambiance thermique (25°C)	23
1) L'exercice musculaire	23
a) son intensité	23
b) sa durée	23
c) l'acide lactique	25
2) La ventilation	26
a) le débit ventilatoire	26
b) le volume courant	26
c) la fréquence respiratoire	26
3) Le métabolisme énergétique	31
a) la consommation d'oxygène	31
b) le quotient respiratoire	34
4) La fréquence cardiaque	36
5) Le bilan thermique	39
a) la température rectale	39
b) la température cutanée	41
6) Le bilan biologique sanguin et urinaire	43
a) le ionogramme sanguin	43
b) le ionogramme urinaire	43
c) les hormones	47
d) les clearances	50
7) Le bilan hydrique	50
a) le volume plasmatique	50
b) la perte de poids	51
c) pertes métaboliques respiratoires	51
d) les pertes en eau	54
e) la production d'eau	58
f) le déficit hydrique	58

II - Etude comparative portant sur 8 sujets effectuant un exercice musculaire sous deux ambiances thermiques différentes	63
1) L'exercice musculaire	63
a) son intensité	63
b) sa durée	63
c) l'acide lactique	63
2) La ventilation	65
a) le débit ventilatoire	65
b) le volume courant	65
c) la fréquence respiratoire	65
3) Le métabolisme énergétique	65
a) la consommation d'oxygène	65
b) le quotient respiratoire	65
4) La fréquence cardiaque	67
5) Le bilan thermique	69
a) la température rectale	69
b) la température cutanée	70
6) Le bilan biologique sanguin et urinaire	71
a) le ionogramme sanguin	71
b) le ionogramme urinaire	71
c) les hormones	73
d) les clearances	76
7) Le bilan hydrique	76
a) le volume plasmatique	76
b) la perte de poids	77
c) les pertes métaboliques respiratoires	77
d) les pertes en eau	77
e) la production d'eau	78
f) le déficit hydrique	81
CHAPITRE IV - DISCUSSION	83
I - Techniques expérimentales	83
1) Le recueil des différents paramètres	83
2) Le choix des sujets d'expériences et leur classification	84
3) Les expériences réalisées et leur caractère physiologique	85
a) l'exercice	85
b) les agressions extérieures	86
c) l'équilibration hydrique avant l'exercice	86

II - L'importance des mouvements hydriques et leur interaction	
avec l'aptitude énergétique	87
1) Les échanges entre milieux intérieur et extérieur	87
a) les pertes d'origine pulmonaire	87
b) les pertes d'origine cutanée	89
c) les pertes rénales	92
2) L'adaptation cardiocirculatoire	95
a) le volume plasmatique	95
b) la fréquence cardiaque	96
3) Les transformations internes	97
a) le métabolisme énergétique	97
b) la production d'eau métabolique	100
4) Le bilan hydrique et l'importance de la rétention	
d'eau dans le secteur extravasculaire comme	
facteur limitant l'aptitude à l'endurance	101
a) le bilan hydrique	101
b) la rétention d'eau dans le secteur extravasculaire	101
CONCLUSIONS	104
BIBLIOGRAPHIE	106

INTRODUCTION

L'eau, base structurale et fonctionnelle de l'organisme, est soumise à des mouvements permanents dont l'intensité dépend étroitement du niveau d'activité corporel.

De nombreux auteurs ont étudié l'effet de l'exercice musculaire ou de l'exposition à la chaleur sur l'équilibre hydrominéral de l'organisme (65) (21) (71). Ils ont constaté des modifications importantes concernant la répartition et la quantité de cette eau lors de telles expériences. Cependant la plupart d'entre eux ne tiennent pas compte, dans le calcul du bilan hydrique, de la quantité d'eau susceptible d'être produite dans les cellules lors de la combustion des différents substrats énergétiques. Ils estiment que la déshydratation peut être assimilée aux pertes sudorales et utilisent donc la perte de poids observée pendant l'expérience comme reflet de ce déficit hydrique (21) (60).

Si une telle manière de procéder peut se concevoir pour une simple exposition à la chaleur ou à la rigueur pour des exercices de faible puissance, elle ne peut valablement se justifier lors des exercices de puissance élevée. En effet, dans ces conditions, le métabolisme énergétique est susceptible de produire une quantité d'eau non négligeable (13) (42), dont il paraît indispensable de tenir compte pour fournir une estimation quantitative valable de l'état de déshydratation.

En effet les mouvements hydriques entraînés par l'exercice peuvent agir sur l'appareil cardiovasculaire et sur les réactions métaboliques de la cellule musculaire. En conséquence, la qualité des transferts hydriques peut apparaître logiquement comme l'un des facteurs importants de l'aptitude à l'endurance, au même titre que celle des transferts de substrats et de déchets entre les milieux extra et intracellulaires.

Pour vérifier une telle hypothèse, il était donc nécessaire d'effectuer un bilan hydrique tenant compte des gains métaboliques lors d'exercices d'intensité élevée prolongés jusqu'à l'épuisement sous deux ambiances thermiques stables (25°C et 35°C).

CHAPITRE I

RAPPELS CONCERNANT LA REPARTITION ET LA CINETIQUE DE L'EAU

DANS L'ORGANISME AU REPOS

I - LA REPARTITION DE L'EAU

La quantité d'eau contenue dans l'organisme est très importante, environ 60 % du poids total chez l'homme et 50 % chez la femme. Il ne s'agit que de moyennes car l'hydratation de chaque sujet dépend en fin de compte de la quantité de tissu adipeux entrant dans la composition de l'organisme. Ce tissu adipeux ne comprend que 15 % d'eau alors que la masse de tissu non gras (masse maigre) renferme en moyenne 75 % d'eau. Cette eau est répartie en plusieurs secteurs :

- l'eau intracellulaire : elle représente 40 à 50 % du poids corporel.
- l'eau extracellulaire : elle correspond chez l'adulte à 25 % du poids corporel et à 45 % de l'eau totale ; on distingue :

- . l'eau plasmatique, qui représente environ 8 % de l'eau totale
- . l'eau interstitielle, qui comprend l'eau des tissus interstitiels, l'eau des tissus de soutien, l'eau transcellulaire et l'eau de la lymphe.

II - LA CINETIQUE DE L'EAU ET LES FACTEURS HORMONAUX INTERVENANT DANS SA REGULATION

1) Les mouvements hydriques

a) les mouvements entre les différents compartiments

Les échanges hydriques entre les secteurs intra et extracellulaires dépendent de phénomènes physiques simples, que ce soit la pression osmotique ou la pression oncotique, ou de phénomènes physiques plus complexes tels que le mécanisme actif de la pompe à sodium qui rejette en permanence le sodium hors de la cellule alors que le potassium s'y accumule.

Les échanges d'eau entre le plasma et les espaces interstitiels sont essentiellement passifs et sont commandés par les divers systèmes de pression intervenant au niveau des capillaires : pressions oncotique, osmotique et hydrostatique.

b) les échanges hydriques de l'organisme avec le milieu extérieur (7)

. les pertes hydriques sont estimées quotidiennement à 200 ml par le tractus gastrointestinal, 400 ml par l'appareil respiratoire, 500 ml par la peau et 1500 ml par les reins, soit 2600 ml au total qui sont équilibrés par les apports.

. les apports hydriques ont une double origine : un apport exogène assuré par la boisson et les aliments, que l'on peut chiffrer en moyenne à 2300 ml par jour,

et un apport endogène (eau métabolique) à partir des processus d'oxydation et de la libération de l'eau liée au glycogène (environ 300 ml par jour).

2) Les facteurs hormonaux intervenant dans sa régulation

Les principales hormones intervenant dans le métabolisme hydrominéral sont l'hormone antidiurétique (ADH) et deux hormones corticosurréaliennes (cortisol et aldostérone).

a) l'hormone antidiurétique

Elle est sécrétée par la neurohypophyse en même temps que la neurophysine (45). Elle agit sur le tube contourné distal et le canal collecteur en faisant varier la perméabilité des parois pour l'eau, provoquant une réabsorption à ce niveau fonction de l'intensité de sa sécrétion. Son action porte également au niveau des sécrétions salivaires et sudorales pour conserver le capital hydrique, ainsi qu'au niveau intestinal où elle accélère l'absorption de l'eau. Cette sécrétion est stimulée par :

- . l'augmentation de la pression osmotique
- . la baisse du volume plasmatique (avec l'action adjuvante de l'angiotensine II).
- . la chaleur (le froid au contraire l'inhibe)
- . les facteurs neurovégétatifs comme la douleur et l'émotion

b) le cortisol

Il est sécrété par la zone fasciculée de la corticosurrénale. Il a une action diurétique en stimulant la réabsorption du sodium et l'élimination du potassium (37). Cette hormone est sécrétée sous l'action de différents facteurs tels que :

- . la baisse de la natrémie
- . l'augmentation de la kaliémie
- . la diminution du liquide extracellulaire

c) l'aldostérone

Elle provient de la zone glomérulée du cortex surrénal. Les stimuli essentiels entraînant un accroissement d'une telle sécrétion semblent être avant tout l'hypovolémie et l'hypotension par divers mécanismes dont le mieux connu est le système rénine angiotensine (19). Des influx vasomoteurs sympathiques parviennent directement aux reins et provoquent une vasoconstriction des artérioles afférentes, de la rénine est ainsi libérée et l'angiotensine formée dans le sang périphérique stimule la sécrétion d'aldostérone. Son action se situe au niveau du tube rénal où elle favorise la réabsorption d'eau et de sodium ainsi que la fuite de potassium.

La répartition et la cinétique de l'eau dans l'organisme sont, comme nous l'avons signalé, susceptibles de subir, au même titre que les mécanismes auxquels ils sont soumis, d'importants réajustements au cours de l'exercice musculaire intense et prolongé. Avant d'envisager les effets propres d'un tel exercice sur l'hydratation de l'organisme, les diverses techniques permettant d'effectuer ce bilan sont décrites dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

TECHNIQUES EXPERIMENTALES

I - PARAMETRES ETUDIES

1) L'exercice musculaire

- son intensité
- sa durée
- l'influence du milieu extérieur :
 - . température ambiante, température sèche (T_{db}), température humide (T_{wb})
 - . hygrométrie relative
 - . vitesse du vent
 - . pression barométrique (B)

2) Les paramètres respiratoires

- le débit ventilatoire ($\dot{V}_E$) et le volume courant (V_T)
- la fréquence respiratoire (f) et son inverse la période (T)
- les concentrations fractionnelles des gaz expirés en O_2 ($F_{E O_2}$) et en CO_2 ($F_{E CO_2}$)
- la température de l'air expiré au niveau du masque et du pneumotachographe
- la consommation d'oxygène ($\dot{V}O_2$) et le rejet du gaz carbonique ($\dot{V}CO_2$)
- le quotient respiratoire (QR)

3) Les paramètres cardiovasculaires

Seule la fréquence cardiaque F a été enregistrée

4) Les paramètres biologiques sanguins et urinaires

- le ionogramme sanguin (avant et après exercice) avec :
 - . l'hématocrite (H^{te}), la glycémie, l'azotémie, la concentration des protéines [protéines], la réserve alcaline [HCO_3^-], l'osmolalité plasmatique, la créatininémie [créatinine].
 - . les concentrations en ions sodium [Na^+], potassium [K^+], chlore [Cl^-], magnésium [Mg^{++}], calcium [Ca^{++}] et phosphores [ions phosphores].
- le ionogramme urinaire (avant et après exercice) avec
 - . les concentrations en ions Na^+ , K^+ et Cl^-
 - . le taux d'urée et l'osmolalité urinaire
- la lactatémie obtenue en fin d'exercice
- le bilan hormonal (avant et après exercice) avec :
 - . les concentrations plasmatiques de l'hormone antidiurétique [ADH]_p, de l'aldostérone [aldostérone] et de la neurophysine [neurophysine]

- . l'activité rénine plasmatique (ARP)
- . la concentration urinaire de l'ADH $[ADH]_u$

5) Les températures corporelles

- la température rectale (Tre)
- la température cutanée (Tsk)

6) La perte de poids

II - TECHNIQUE DE RECUEIL DES DIFFERENTS PARAMETRES

1) Le cadre expérimental

L'expérience se déroule dans le caisson thermoclimatique IOTHERMA du laboratoire de physiologie du CRSSA de LYON (Docteur HENANE), dont la température ambiante et la vitesse du vent sont fixées sur un tableau de commande CORECI PYRETRON KY type KYRP (voir figure n°1). La température ambiante, la température des parois, la température sèche, la température humide et la vitesse du vent dans le caisson sont en permanence contrôlées sur un enregistreur multivoie MECI.

A l'intérieur du caisson se trouve une balance différentielle TESTUT type 9099 qui permet la mesure en continu de la perte de poids par l'intermédiaire d'un stylet inscripteur en contact avec un cylindre tournant à vitesse constante (2 mm/min). La sensibilité de cette balance est de 1 gramme.

Sur le plateau de cette balance, dans le caisson, se trouve un ergocycle SCHWINN sur lequel s'effectue l'exercice musculaire. L'intensité de l'exercice est fixée par l'intermédiaire d'un sélecteur de puissance situé à l'avant de l'ergocycle comportant un cadran subdivisé en puissance de travail allant de zéro à 2100 kgm/min.

2) Les paramètres respiratoires

Ils sont mesurés par un circuit comprenant :

a) un ensemble masque-valve

Celui-ci se compose d'un masque souple FORM IT de taille 4 ou 5, muni d'une valve RUDOLPH d'espace mort réduit (77 cc), et dont la grande dimension du diamètre interne oppose une très faible résistance à la respiration rapide ($\Delta_{cm} H_2O = 6$ pour 330 LPM). Le masque facial qui permet une respiration aussi bien nasale que buccale, est solidarisé à la face du sujet par une bonnette à quatre sangles lors de l'exercice musculaire.

b) un circuit expiratoire

- la valve expiratoire est reliée par l'intermédiaire d'un tuyau en plastique léger à armature métallique spiralée de 30 mm de diamètre interne à un pneumotachographe de JAEGER, lui-même relié à un capteur de pression et à un auxiliaire (CH 5112/0. N°1191 $\pm$ 2 mbar ; SCHLUMBERGER CA 1065).

- des analyseurs de gaz BECKMANN branchés sur le circuit expiratoire permettent d'obtenir les concentrations fractionnelles des gaz expirés. Pour l'oxygène : analyseur OM-11 et pour l'anhydride carbonique : analyseur LB-2.

- les signaux délivrés par les analyseurs et par un intégrateur de ventilation permettent d'obtenir en permanence $\dot{V}O_2$, $\dot{V}CO_2$, $\dot{V}_E$, V_T , f et QR , grâce à leur traitement au niveau d'un calculateur analogique STEE n°01 monté en série.

- les résultats sont affichés directement sur un voltmètre numérique METRIX MX 781 intégré au calculateur, et enregistrés par un appareil BECKMANN type R DYNOGRAPH

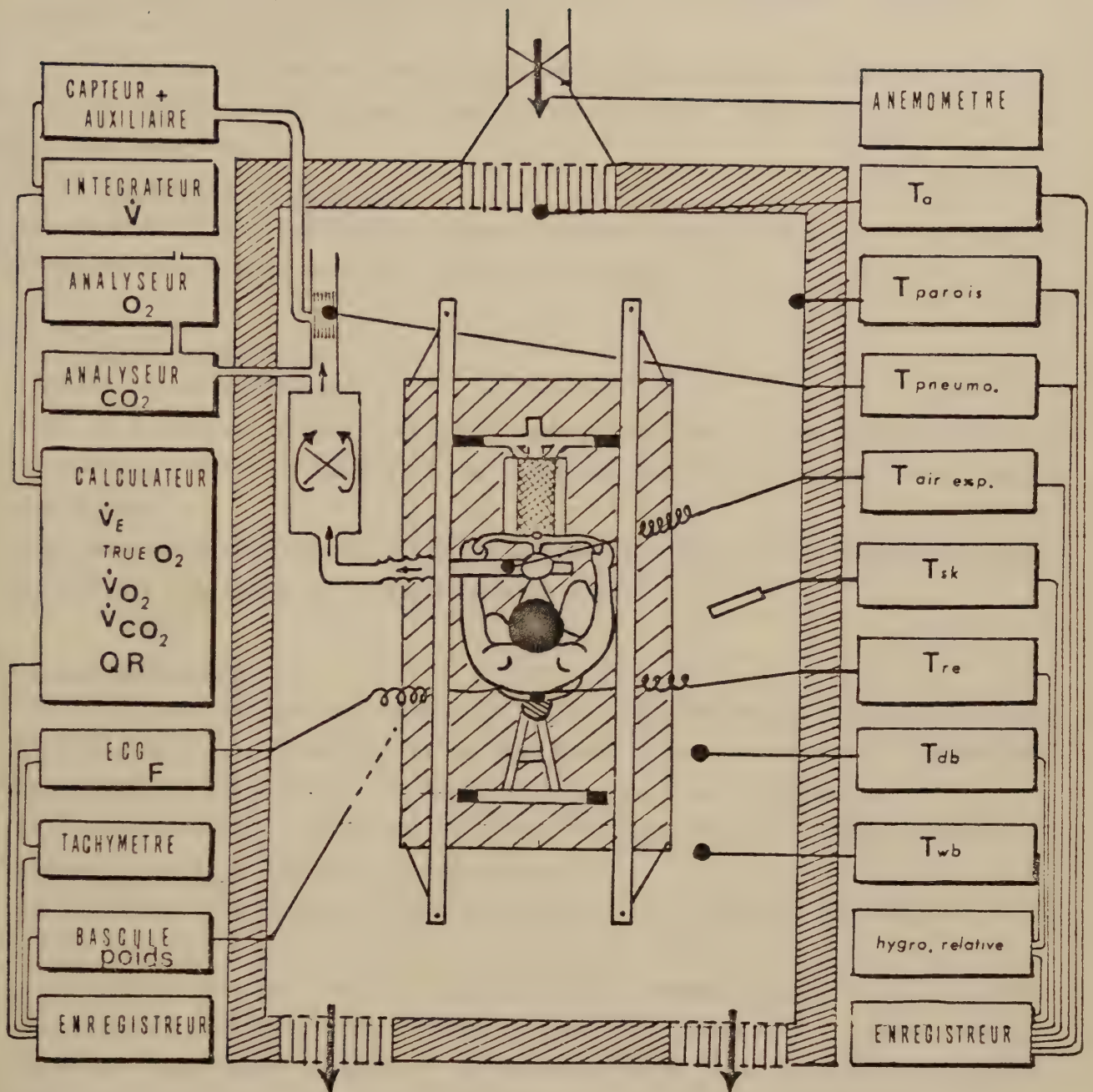


figure n° 1

Les conditions expérimentales

Sur cette figure sont représentées les techniques de recueil des paramètres respiratoires, des différentes températures et de la perte de poids en continu.

RECORDER en ce qui concerne l'électrocardiogramme, $\dot{V}_E$ et la fréquence respiratoire.

- l'étalonnage de ventilation est réalisé grâce à une seringue de précision (HAMILTON) de 1 litre de volume.
- l'enregistrement simultané des conditions ambiantes permet d'exprimer les volumes et les débits dans les conditions souhaitées BTPS, ainsi que $\dot{V}O_2$ et $\dot{V}CO_2$ dans les conditions STPD.

c) la soupape inspiratoire

Elle reste à l'air libre durant l'exercice musculaire, l'air inspiré est donc celui qui se trouve dans le caisson thermoclimatique.

3) La fréquence cardiaque

Elle est enregistrée :

- soit en D_1 par une sangle comprenant deux électrodes plaques exploratrices latérorothoraciques droite et gauche et une électrode de référence dorsale sous scapulaire gauche.
- soit par des électrodes BECKMANN antiadhésives à collerettes enduites de pâte conductrice, reliées à un cardiotechymètre STEE n°02.

4) Les températures

- La température rectale est mesurée à l'aide d'un thermocouple "CUIVRE CONSTANTAN" avec pastilles en argent. La soudure froide étant maintenue à 0°C dans un bain de Toluène placé dans un mélange de glace et d'eau distillée.
- la température de l'air expiré au niveau du masque et du pneumotachographe est également mesurée à l'aide de thermocouples.
- la température cutanée est mesurée à l'aide d'un radiomètre HEIMANN GMBH KT 41.

Une table traçante HEWLETT PACKARD n°9125 B permet d'enregistrer la courbe d'évolution de la température rectale en fonction du temps. Les valeurs numériques de la température rectale, de la température de l'air au niveau du pneumotachographe et du masque sont enregistrées par un télétape PERIFERIC.

5) La mesure des paramètres biologiques sanguins nécessite la pose d'un court cathéter en téflon BD. LONG DWELL I.V. Cathéter NEEDLE 18 G 2 ½ dans une veine superficielle du pli du coude, puis un prélèvement différé de 55 ml de sang veineux à l'aide d'une seringue stérile de 70 ml.

a) le ionogramme sanguin

- technique de recueil : 10 ml de sang veineux sont prélevés sur tube hépariné.
- méthodes de mesure :
 - . l'hématocrite est mesuré par centrifugation sur un microtube
 - . le ionogramme sanguin est obtenu sur un appareil à flux continu SMA 6/60

TECHNICON au laboratoire de Pharmacie de l'H.I.A. Desgenettes (Docteur PARADO) : $[Na^+]$ et $[K^+]$ sont mesurées par photométrie, la glycémie par méthode enzymatique, les autres composants du ionogramme sont obtenus par colorimétrie. Seule $[Mg^{++}]$ est mesurée par méthode manuelle colorimétrique.

b) l'acide lactique sanguin

La mesure de la concentration sanguine du lactate est effectuée sur un échantillon de 100 μ l prélevé sur le sang veineux après exercice suivant la technique de S. QUARD et coll. (59).

c) les hormones plasmatiques

- technique de recueil

45 ml de sang veineux prélevés avant et après l'exercice musculaire sont répartis dans des tubes de la façon suivante :

- . 10 ml sur tube contenant de l'EDTA, pour mesurer l'activité rénine plasmatique
- . 25 ml sur tube hépariné pour mesurer le taux d'ADH et l'osmolalité plasmatique
- . 5 ml sur tube contenant de l'EDTA pour mesurer le taux de l'aldostérone plasmatique.
- . 5 ml sur tube sec pour mesurer le taux de la neurophysine plasmatique.

Les tubes une fois remplis sont placés dans de la glace et immédiatement expédiés au Professeur CHARIB du laboratoire de Physiologie A (Professeur CIER) où seront effectués les dosages hormonaux.

- méthodes de mesure

- . ADH plasmatique : par dosage biologique sur le rat anesthésié à l'éthanol, selon la technique de CHARIB (26).
- . Neurophysine : par radioimmunodosage selon la technique de LEGROS (45).
- . Activité rénine plasmatique : par radioimmunodosage de l'angiotensine I appliqué à la détermination de l'ARP selon la technique de VINCENT (73).
- . Aldostérone : par radioimmunodosage selon la technique de BIZOLLON (14).

6) Les paramètres biologiques urinaires

a) le ionogramme urinaire

- technique de recueil : on prélève dans un tube sec entre 5 et 10 ml d'urine lors des mictions imposées à 14 h, 15 h et 10 minutes après la fin de l'exercice.
- méthode de mesure : on utilise un appareil à flux continu SMA 6/60 TECHNICON.

b) l'ADH urinaire

- technique de recueil : les urines des 3 mictions totales imposées au cours de l'expérience sont recueillies sur flacons secs et la quantité émise est soigneusement mesurée. Après avoir prélevé la quantité d'urine nécessaire à la mesure du ionogramme, les flacons sont placés dans de la glace et expédiés immédiatement au laboratoire de Physiologie A.
- méthode de mesure : par radioimmunodosage selon la technique de MILLER (48) modifiée (2).

III - SUJETS D'EXPERIENCES

A température ambiante de 25°C, 14 sujets de sexe masculin se sont prêtés à l'expérimentation ; ils sont en bonne santé, âgés de 19 à 27 ans (voir le tableau n°1).

Il est important de souligner que 6 sujets sont des cyclistes amateurs, de haut niveau, entraînés aux compétitions. Les 8 autres sujets sont par contre à des niveaux d'entraînement et d'endurance différents et pratiquent une activité sportive soit de façon discontinue en tant que distraction, soit de façon continue à titre universitaire dans le cadre d'un sport collectif (football, rugby). Seuls ces 8 sujets ont participé à l'expérimentation supplémentaire à 35°C.

TABLEAU N°1

sujets	âge années	poids kg	taille cm	sports pratiqués
COU	22	61	171	cyclisme (compétition)
CEL	20	62	170	cyclisme (compétition)
DUM	22	71	179	cyclisme (compétition)
SAV	27	66	175	cyclisme (compétition)
MEL	26	73	178	rugby (universitaire)
MEF	24	72	174	rugby (universitaire)
WEL	24	67	171	cyclisme (détente)
LAS	21	83	176	rugby (universitaire)
MAR	19	57	166	cyclisme (compétition)
DUT	19	61	167	cyclisme (compétition)
DEL	23	73	180	pétanque (détente)
TUR	24	68	172	football (universitaire)
DRA	25	80	184	escrime (détente)
JOA	25	75	173	rugby (universitaire)

CARACTERISTIQUES BIOMETRIQUES DES SUJETS D'EXPERIENCES

IV - EXPERIMENTATION

1) Expériences préliminaires

La consommation maximale d'oxygène ($\dot{V}O_2$ max) a été déterminée pour chaque sujet par méthode directe sur bicyclette ergométrique selon la technique de S. QUARD et coll. (57) qui consiste à faire effectuer une série d'exercices d'intensité croissante et à mesurer la quantité d'oxygène consommée pendant la 5^{ème} minute de chacun d'entre eux.

La fréquence cardiaque maximale est également déterminée au cours de cette expérience préliminaire (voir tableau n°2).

TABLEAU N° 2

sujets	$\dot{V}O_2$ max		fréquence cardiaque maximale bat/min
	l/min	ml/min/kg	
COU	4,43	72,62	197
CEL	5,24	84,52	194
DUM	4,68	65,92	200
SAV	4,86	73,64	181
MEL	3,81	52,19	180
MEF	3,41	47,36	199
WEL	4,32	64,48	214
LAS	3,50	41,18	207
MAR	4,64	81,40	189
DUT	4,42	72,46	205
DEL	3,83	52,47	187
TUR	3,60	52,94	192
DRA	3,59	44,88	189
JOA	4,21	56,13	196

CONSOMMATION MAXIMALE D'OXYGENE
ET FREQUENCE CARDIAQUE MAXIMALE

2) Expériences proprement dites

a) déroulement d'une expérience type

- phase préparatoire :

12h30 Avant le déjeuner, on impose une miction totale au sujet. Puis celui-ci bénéficie d'un repas composé :

- . d'une entrée
- . d'une viande grillée avec des légumes
- . d'une tranche de pain avec un fromage
- . d'un fruit.

On impose une ingestion d'eau supérieure à 300 ml à l'exclusion de toute autre boisson. On demande au sujet de ne plus uriner avant son arrivée au laboratoire.

14h Arrivée du sujet au laboratoire de physiologie du CRSSA. On impose une miction totale, l'urine est recueillie dans un flacon et la quantité émise est mesurée. On prélève entre 5 et 10 ml d'urine pour le ionogramme, puis le flacon est placé dans de la glace. On fait boire au sujet une quantité d'eau correspondant à la quantité d'urine émise.

Le sujet est alors placé dans le caisson thermoclimatique, dont on a réglé par avance la température ambiante (25°C ou 35°C), la vitesse du vent (1,2 m/s) et l'hygrométrie relative (30 %). Il est vêtu seulement d'un short (et d'un peignoir si la température ambiante est de 25°C). Une sonde rectale est mise en place pour enregistrer les variations de la température rectale. Des électrodes thoraciques sont disposées pour mesurer la fréquence cardiaque, et la qualité de l'enregistrement est immédiatement contrôlée. Puis le sujet s'assied confortablement.

14h30 Mise en place d'un cathéter court en téflon dans une veine superficielle du pli du coude afin de prélever des échantillons de sang veineux avant et après l'exercice musculaire.

14h55 Prélèvement de 55 ml de sang veineux à l'aide d'une seringue stérile de 70 ml, que l'on répartit dans les différents tubes à essai pour les dosages biologiques sanguins. Ces prélèvements sont placés dans de la glace.

15h Une nouvelle miction totale est imposée au sujet, la quantité d'urine émise est mesurée, une compensation en eau équivalente est fournie au sujet. On prélève 5 à 10 ml d'urine pour le ionogramme. Le flacon d'urine est placé dans de la glace.

15h55 On installe le sujet sur la bicyclette ergométrique en réglant la hauteur de la selle de façon à ce que le sujet, une fois assis, ait une parfaite extension de son membre inférieur, le pied reposant sur la pédale la plus basse. La position du masque est alors réglée de façon à ce que son application assure une parfaite étanchéité en l'absence de tout phénomène douloureux.

- phase expérimentale :

Une fois le sujet au calme, on met en marche la bascule sur laquelle est disposé l'ergocycle et on enregistre les valeurs de repos du métabolisme respiratoire, de la fréquence cardiaque, et des températures rectale et cutanée.

Bien que la puissance de travail soit théoriquement indépendante de la fréquence de pédalage, un métronome est utilisé pour aider le sujet à obtenir une cadence régulière aux environs de 70 coups de pédale par minute.

Le déclenchement du chronomètre marque le début de l'exercice musculaire dont la puissance est choisie de façon à obtenir une consommation d'oxygène représentant un pourcentage du $\dot{V}O_2$ max aussi proche que possible de 80 %.

. au temps 2 minutes sont enregistrés les paramètres respiratoires ainsi que la fréquence cardiaque.

. au temps 5 minutes puis toutes les 5 minutes sont enregistrés les paramètres respiratoires, la fréquence cardiaque et les températures suivantes :

+ la température rectale

+ la température cutanée, par une personne placée en permanence dans le caisson, et qui enregistre Tsk sur 10 parties du corps (front, thorax, abdomen, dos, bras, avant-bras, main, cuisse, mollet et pied).

+ la température ambiante régnant dans le caisson (Tdb, Twb).

+ la température de l'air expiré au niveau du masque et du pneumotachographe.

. à l'arrêt de l'exercice musculaire : on arrête le chronomètre et on prélève immédiatement 55 ml de sang veineux que l'on répartit comme précédemment dans les différents tubes à essai. On effectue en plus la mesure de la lactatémie après exercice. Les prélèvements sont placés dans de la glace en attendant leur transport.

. 10 minutes après l'arrêt de l'exercice musculaire : une dernière miction totale est imposée au sujet, la quantité d'urine émise est mesurée, on en prélève 5 à 10 ml pour le ionogramme et le flacon d'urine est placé dans de la glace.

b) déroulement des séries expérimentales

24 expériences ont été réalisées suivant le même protocole mais à des températures ambiantes différentes : 16 expériences à 25°C et 8 à 35°C. Ces expériences se sont déroulées suivant un rythme de une à deux par semaine sur une période de 6 mois.

Les sujets qui ont travaillé sous les 2 températures ambiantes ont d'abord accompli l'épreuve à 25°C, celle à 35°C se déroulant en moyenne un mois

après avec la même puissance de travail.

Au cours de ces 24 expériences :

- . le sujet (DUT) a présenté un épisode lipothymique au cours de la pose du cathéter.
- . les composantes du ionogramme sanguin du sujet (DUT) n'ont pu être dosées après exercice du fait d'un prélèvement insuffisant.
- . les valeurs des hématocrites des sujets (MAR) et (MEL) avant et après exercice pour 25°C et 35°C ne sont pas connues, de même que les valeurs des ionogrammes urinaires du sujet (TUR) à 25°C.

V - EXPLOITATION DES RESULTATS

La première partie de ce travail consiste à transformer en valeurs numériques ceux des résultats qui sont obtenus par enregistrement graphique.

1) Exploitation des enregistrements

Elle nécessite la mesure des tracés et la transformation des valeurs obtenues en grandeurs réelles affectées d'une unité appropriée.

- la mesure des paramètres ventilatoires $\dot{V}_E$, V_T , T et f est effectuée cycle à cycle sur des enregistrements graphiques (figure n°2) réalisés toutes les 5 minutes. La vitesse de déroulement du papier est contrôlée par un signal de temps battant la seconde.
- la mesure de la fréquence cardiaque F a été effectuée au cours des premières expériences à partir de l'enregistrement ECG en mesurant la distance séparant un minimum de 21 déflexions QRS. Par la suite, en plus de cette technique, F a été obtenue simultanément grâce à un cardiotechymètre à affichage numérique.
- la mesure de la perte de poids s'effectue à partir de l'enregistrement obtenu sur papier millimétré. En abscisse se trouve le temps (1 cm = 5 min) et en ordonnée la perte de poids (1 cm = 28 g). Un exemple de tracé est représenté dans la figure n°3.

2) Exploitation des résultats numériques

a) la consommation d'oxygène

Elle est calculée automatiquement à partir de la ventilation exprimée en conditions standard (STPD) et des concentrations fractionnelles des gaz expirés et inspirés.

$$\dot{V}O_2 = \dot{V}_E \text{ STPD} \left[F_{IO_2} \left(\frac{1 - F_{EO_2} - F_{ECO_2}}{1 - F_{IO_2} - F_{ICO_2}} \right) - F_{ECO_2} \right]$$

F_{IO_2} et F_{ICO_2} sont les concentrations fractionnelles des gaz inspirés.

Les valeurs obtenues toutes les 5 minutes permettent de connaître $\dot{V}O_2$ à 5 minutes et à la fin de l'épreuve, ainsi que $\dot{V}O_2$ moyen ($\overline{\dot{V}O_2}$) pour chaque sujet.

La connaissance de $\dot{V}O_{2 \text{ max}}$ permet d'exprimer la puissance relative de l'exercice accompli par le rapport :

$$\frac{\overline{\dot{V}O_2} \times 100}{\dot{V}O_{2 \text{ max}}}$$

b) le volume plasmatique

Au cours de l'exercice musculaire, la variation relative du volume plasmatique (% Δ VP) est obtenue à partir de l'équation utilisée par VAN BEAUMONT (71) :

$$\% \Delta VP = \frac{100}{100 - H_1^{te}} \times 100 \left(\frac{H_1^{te} - H_2^{te}}{H_2^{te}} \right)$$

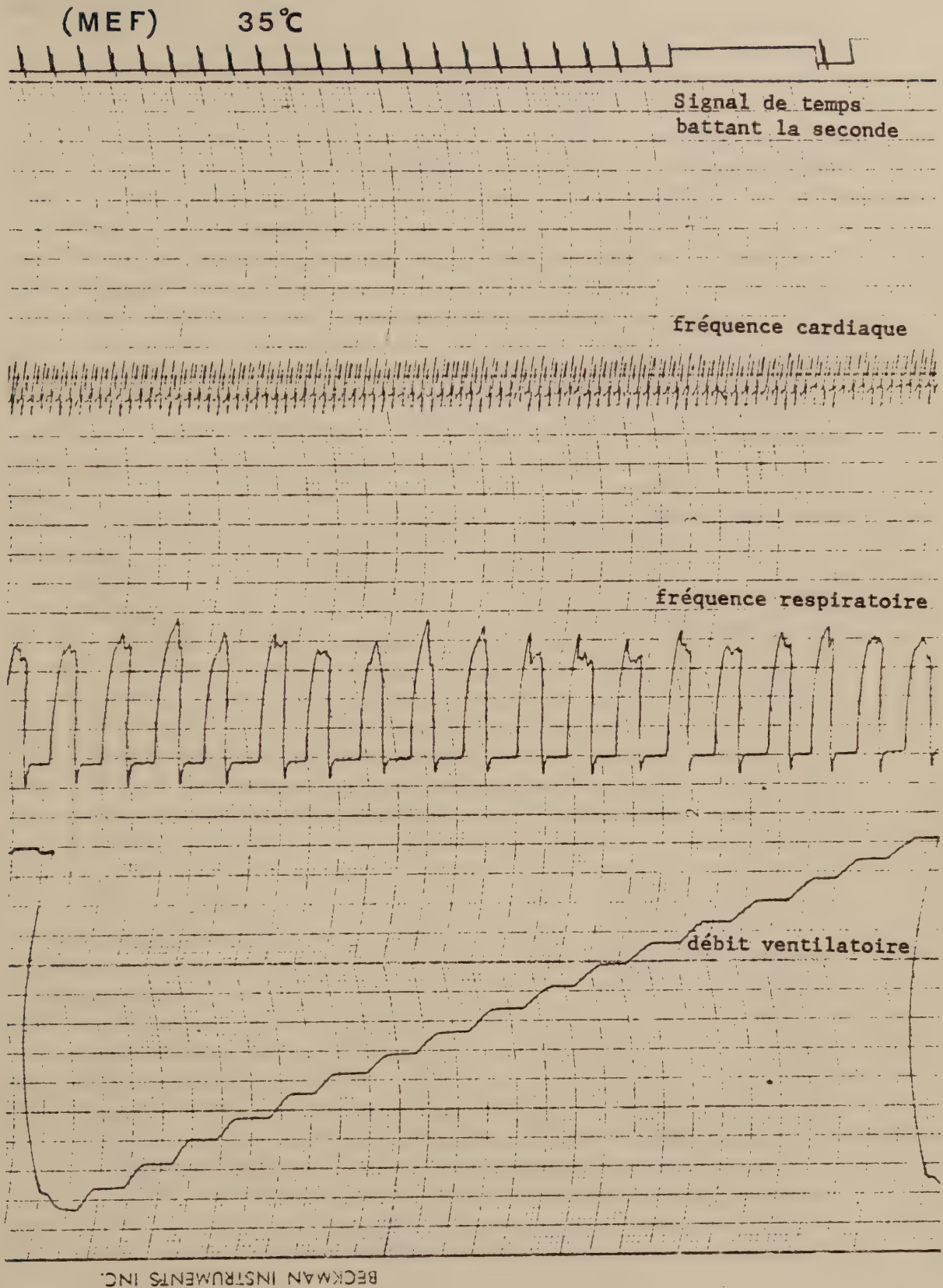
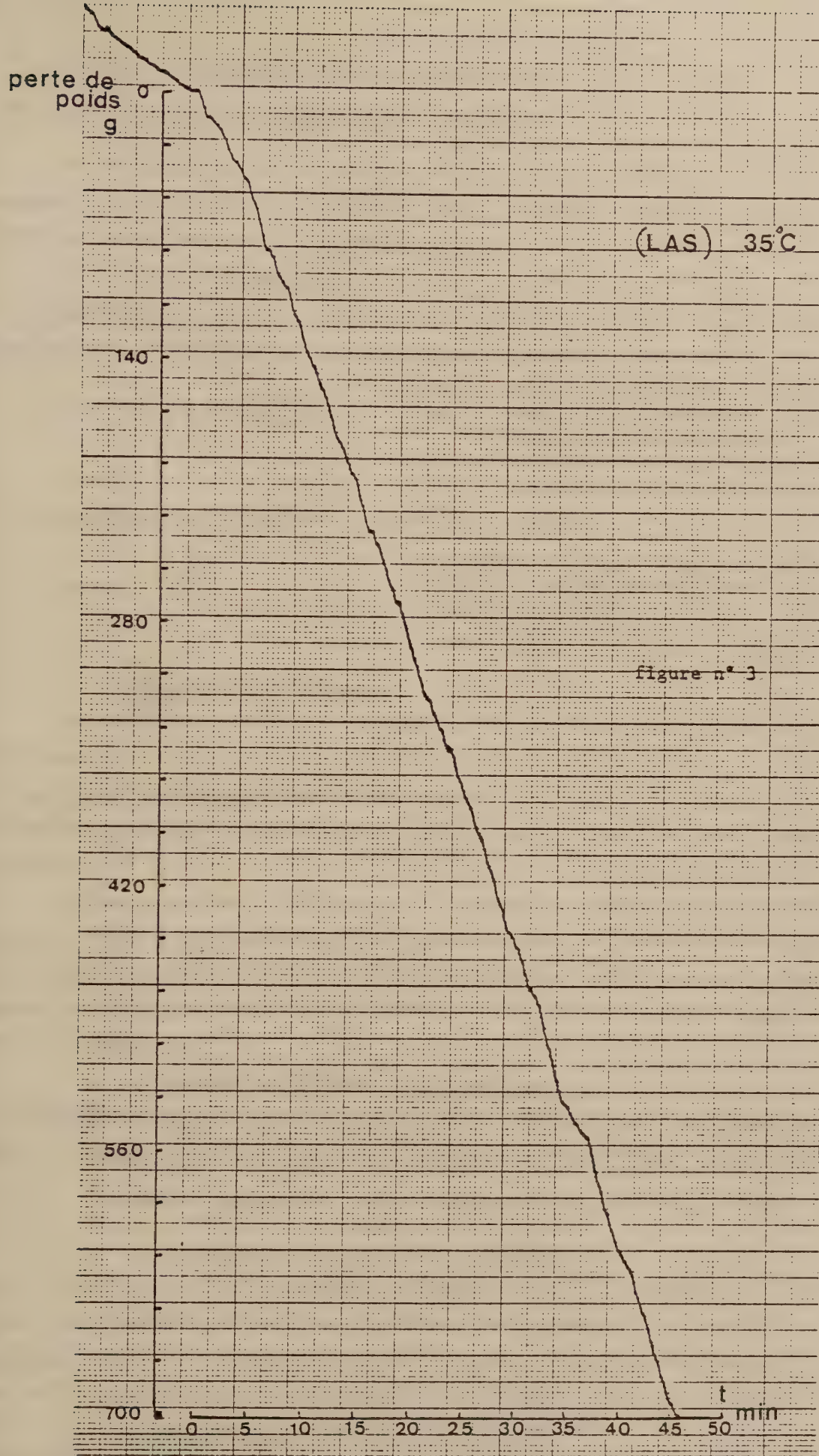


figure n° 2
Exemple d'enregistrement graphique
des paramètres respiratoires



Exemple d'enregistrement en continu de la perte de poids

H_1^{te} = valeur de l'hématocrite avant l'exercice

H_2^{te} = valeur de l'hématocrite après l'exercice

Si on admet que le volume plasmatique avant l'exercice (VP_1) représente approximativement 4,5 % du poids du corps, on peut estimer sa variation absolue (ΔVP) et sa valeur après l'exercice (VP_2).

c) les clearances

- la clearance de l'eau libre qui est le témoin du travail de dilution ou de concentration par le rein, est exprimée par la formule classique :

$$C_{H_2O} = \dot{V} \left(1 - \frac{U_{osm}}{P_{osm}} \right)$$

U_{osm} = osmolalité urinaire en mOsm/kg

P_{osm} = osmolalité plasmatique en mOsm/kg

$\dot{V}$ = débit urinaire en ml/min

C_{H_2O} = clearance de l'eau libre en ml/min, estimée avant et pendant l'exercice

- la clearance de l'urée est estimée par la formule :

$$C_{urée} = \frac{U \dot{V}}{P}$$

U = concentration urinaire de l'urée en mg/l

P = concentration plasmatique de l'urée en mg/l

$\dot{V}$ = débit urinaire en ml/min

$C_{urée}$ = clearance de l'urée en ml/min, estimée avant et pendant l'exercice

d) le bilan hydrique

Au cours de l'exercice musculaire, on distingue les pertes et les productions hydriques.

- les pertes hydriques (exprimées en g/min)

Elles représentent la somme des pertes en eau par voies cutanée, respiratoire et rénale.

La perte de poids obtenue après l'exercice musculaire est constituée par les pertes en eau par voies cutanée et respiratoire, et les pertes de poids par échanges gazeux respiratoires (ou pertes métaboliques respiratoires). Cette perte de poids ne tient pas compte de la quantité d'urine qui se trouve dans la vessie à la fin de l'exercice.

. les pertes métaboliques respiratoires

La différence entre le poids d'oxygène consommé par unité de temps et le poids de gaz carbonique rejeté par unité de temps est obtenue par l'équation suivante :

$$\text{Poids } O_2 \text{ consommé} - \text{Poids } CO_2 \text{ rejeté} = 1,9643 \dot{V}O_2 (0,7273 - QR)$$

. les pertes d'eau par voie respiratoire

Il y a environ 30 % d'hygrométrie relative dans l'air inspiré et à peu près 100 % dans l'air expiré. Connaissant le débit inspiratoire $\dot{V}_I$ et le débit expiratoire $\dot{V}_E$, on peut estimer le bilan des pertes d'eau par voie respiratoire par la différence entre la quantité d'eau inspirée et celle rejetée par unité de temps (35)(49).

. les pertes en eau par voie cutanée

Elles sont obtenues en soustrayant aux pertes de poids ramenées à la minute les

pertes de poids respiratoires par échanges gazeux et par élimination hydrique.

• les pertes en eau par voie rénale

Elles sont obtenues en mesurant la quantité d'urine émise 10 minutes après l'exercice, cette quantité étant ramenée à la minute pour obtenir le débit urinaire.

- les productions d'eau (exprimées en g/min)

Elles résultent des transformations internes au cours de l'exercice musculaire.

• première équation

Considérant la loi de conservation des masses, on peut poser l'équation :

Poids de déchets produits = poids de substrats utilisés + poids d'O₂ consommé

Poids de déchets produits = poids d'eau métabolique + poids d'urée + poids de CO₂

Poids de substrats utilisés = poids de glucides + poids de lipides + poids de protides

Si $\dot{G}$, $\dot{L}$ et $\dot{P}$ représentent respectivement les poids de glucides, de lipides et de protides consommés par minute, cette équation reste valable si on ramène les variations massiques à la minute :

$$(1) \quad [\dot{H}_2O] + \dot{U} + \dot{CO}_2 = \dot{G} + \dot{L} + \dot{P} + \dot{O}_2$$

• le poids d'eau métabolique apparue par minute $[\dot{H}_2O]$ peut s'exprimer en fonction du poids des différents substrats utilisés ($\dot{G}$, $\dot{L}$ et $\dot{P}$).

D'après WEISFOGH (77), l'utilisation de 1 g de glycogène fournit 3,3 g d'eau (2,70 g d'eau liée au glycogène et 0,60 g d'eau par glycolyse) ; de même, l'utilisation respective de 1 g de lipides et de 1 g de protides fournit 1,12 g d'eau par lipolyse et 0,50 g d'eau par protéolyse d'où :

$$(1a) \quad [\dot{H}_2O] = \dot{G}(3,30) + \dot{L}(1,52) + \dot{P}(0,50)$$

• le poids d'urée apparue par minute $\dot{U}$ est obtenu à partir de la mesure du volume urinaire recueilli après l'exercice et de la variation de la concentration urinaire de l'urée corrigée de la variation du taux d'urée plasmatique.

• l'estimation du poids de CO₂ apparue par minute ($\dot{CO}_2$) et du poids d'O₂ consommé par minute ($\dot{O}_2$) est effectuée à partir de VCO₂ et de VO₂ recueillis à la bouche.

• deuxième équation

L'équation suivante :

$$(2) \quad F_G + F_L + F_P = 1$$

traduit le fait que la somme totale des pourcentages d'énergie produite par les différents substrats est égale à 1.

F_G , F_L et F_P représentent respectivement la part revenant aux glucides, lipides et protides. Or :

$$F_G = \frac{\dot{E}_G}{\dot{E}_t}$$

(pour les lipides et les protides on a respectivement $F_L = \frac{\dot{E}_L}{\dot{E}_t}$ et $F_P = \frac{\dot{E}_P}{\dot{E}_t}$)

. $\dot{E}_G$ représente la dépense énergétique revenant aux glucides (pour les lipides et les protides on a respectivement $\dot{E}_L$ et $\dot{E}_P$).

$$\dot{E}_G = \dot{G} \times \text{équivalent calorique des glucides}$$

La détermination des coefficients caloriques des différents substrats utilisés est effectuée à partir du coefficient calorique de l'oxygène pour ces substrats. Pour le glucose, ce coefficient est de 5,05 Kcal/litre d' O_2 utilisé ; sachant que 1 litre d' O_2 est susceptible de brûler en moyenne 1,34 g de glucose, l'équivalent calorique des glucides est alors estimé à $\frac{5,05}{1,34}$ Kcal/g de glucose consommé. (la même démarche est appliquée pour obtenir l'équivalent calorique des lipides et des protides).

. $\dot{E}_t$ représente la dépense énergétique totale estimée d'après la formule tirée des tables de ZUNTZ et SCHUMBURG citées dans le GEIGY (p. 638) :

$$\dot{E}_t = \dot{V}O_2 (1,234QR + 3,82)$$

L'équation (2) peut donc s'exprimer en fonction du poids des différents substrats utilisés.

. détermination de F_P , F_G et F_L :

Considérant que le catabolisme de 1 g de protides conduit à la formation de 0,343 g d'urée et connaissant le volume urinaire recueilli après l'exercice et les variations absolues des concentrations de l'urée urinaire et sanguine, on peut estimer $\dot{P}$ et ainsi obtenir F_P :

$$F_P = 13,848 \frac{\dot{U}}{\dot{E}_t}$$

En reportant F_P dans les équations (1) et (2), on obtient un système de 2 équations à 2 inconnues ; ce qui permet d'obtenir F_G :

$$F_G = \frac{100QR - 75,87 - F_P(1,234QR - 3,82)}{5,95QR + 18,43}$$

et de la même manière F_L .

. détermination de $[H_2O]$:

Connaissant F_G , F_L et F_P , on a $\dot{G}$, $\dot{L}$ et $\dot{P}$; il suffit d'appliquer la formule citée en (1a) pour obtenir la production d'eau métabolique par minute.

3) Classification des sujets en fonction de leur endurance

Il apparaît intéressant de grouper les sujets suivant leur endurance afin de comparer groupe à groupe les différentes valeurs numériques obtenues. Pour cela, on utilise les courbes d'ASTRAND et RODAHL (7) concernant l'aptitude à l'exercice prolongé.

On place en ordonnée la consommation d'oxygène en % du maximum et en abscisse la durée de l'exercice musculaire (voir figure n°4). Suivant la position des points obtenus par rapport à la courbe des sujets endurants ou non endurants, on a subdivisé les sujets en 3 groupes :

- groupe I : sujets endurants
- groupe II : sujets moyennement endurants
- groupe III : sujets peu endurants

endurants I	moyennement endurants II	peu endurants III
COU	MEF	DEL
CEL	WEL	TUR
DUM	LAS	DRA
SAV	MAR	JOA
MEL	DUT	

Cette subdivision n'a pas été utilisée lors de l'étude comparative d'un exercice musculaire sous 2 ambiances thermiques différentes, les valeurs numériques obtenues pour le groupe des 8 sujets à 25°C sont comparées à celles obtenues à 35°C.

Les moyennes collectives sont affectées de leur écart type et regroupées sous forme de tableaux où le chiffre 1 indique les valeurs avant l'exercice et le chiffre 2 les valeurs après l'exercice.

Les comparaisons de moyennes sont réalisées grâce au test de STUDENT, les variations significatives étant représentées dans les tableaux par :

* pour $0,01 < P < 0,05$ et ** pour $P < 0,01$

Les différents calculs statistiques sont effectués sur une calculatrice HEWLETT PACKARD 98 - 20 - A.

CHAPITRE III : RESULTATS

Les valeurs numériques obtenues sont étudiées en fonction :

- de l'endurance des sujets sous une même ambiance thermique
- des deux ambiances thermiques différentes

Ce chapitre est donc divisé en deux parties.

I - ETUDE COMPARATIVE ENTRE TROIS GROUPES DE SUJETS D'ENDURANCE DIFFERENTE SOUS UNE MEME AMBIANCE THERMIQUE (25°C).

Au cours de cette première partie, on considérera successivement l'exercice musculaire, la ventilation, le métabolisme énergétique, la fréquence cardiaque, le bilan thermique, le bilan biologique sanguin et urinaire et en dernier lieu le bilan hydrique avec les pertes en eau et la production d'eau durant l'exercice musculaire.

1) L'exercice musculaire

a) son intensité

Les résultats concernant l'intensité, la durée et la lactatémie après exercice sont rassemblés dans le tableau n° 3.

Connaissant $\dot{V}O_2$ max de chaque sujet et $\overline{\dot{V}O_2}$ au cours de l'exercice réalisé à 25°C, on peut déterminer la puissance relative de cet exercice par le rapport : $\frac{\dot{V}O_2}{\dot{V}O_{2\max}} \times 100$; cette puissance relative est en moyenne plus importante pour le groupe I ($88,6 \pm 7,7 \%$) que pour les groupes II ($78,2 \pm 7,4 \%$) et III ($77,5 \pm 7 \%$). Comme le met en évidence l'écart type, l'intensité de l'exercice est assez différente d'un sujet à l'autre ; elle s'échelonne de 67 % pour le sujet (WEL) à 97 % de $\dot{V}O_2$ max pour le sujet (SAV).

b) sa durée

Elle est sensiblement identique pour les groupes I ($57 \pm 32,5$ min) et II (57 ± 20 min), mais elle est bien inférieure pour le groupe III ($38 \pm 8,3$ min). Le temps d'exercice le plus bas est de 32 minutes pour le sujet (DEL) et le plus long a été obtenu par le sujet (COU) : 106 minutes.

La figure n° 4 représente pour chaque groupe la moyenne des intensités du travail musculaire en fonction de la moyenne des durées d'exercice. Les groupes sont situés par rapport aux courbes d'endurance d'ASTRAND et RODAHL, qui ont été utilisées pour classer les sujets suivant leur position par rapport aux courbes "très endurants" et "peu endurants".

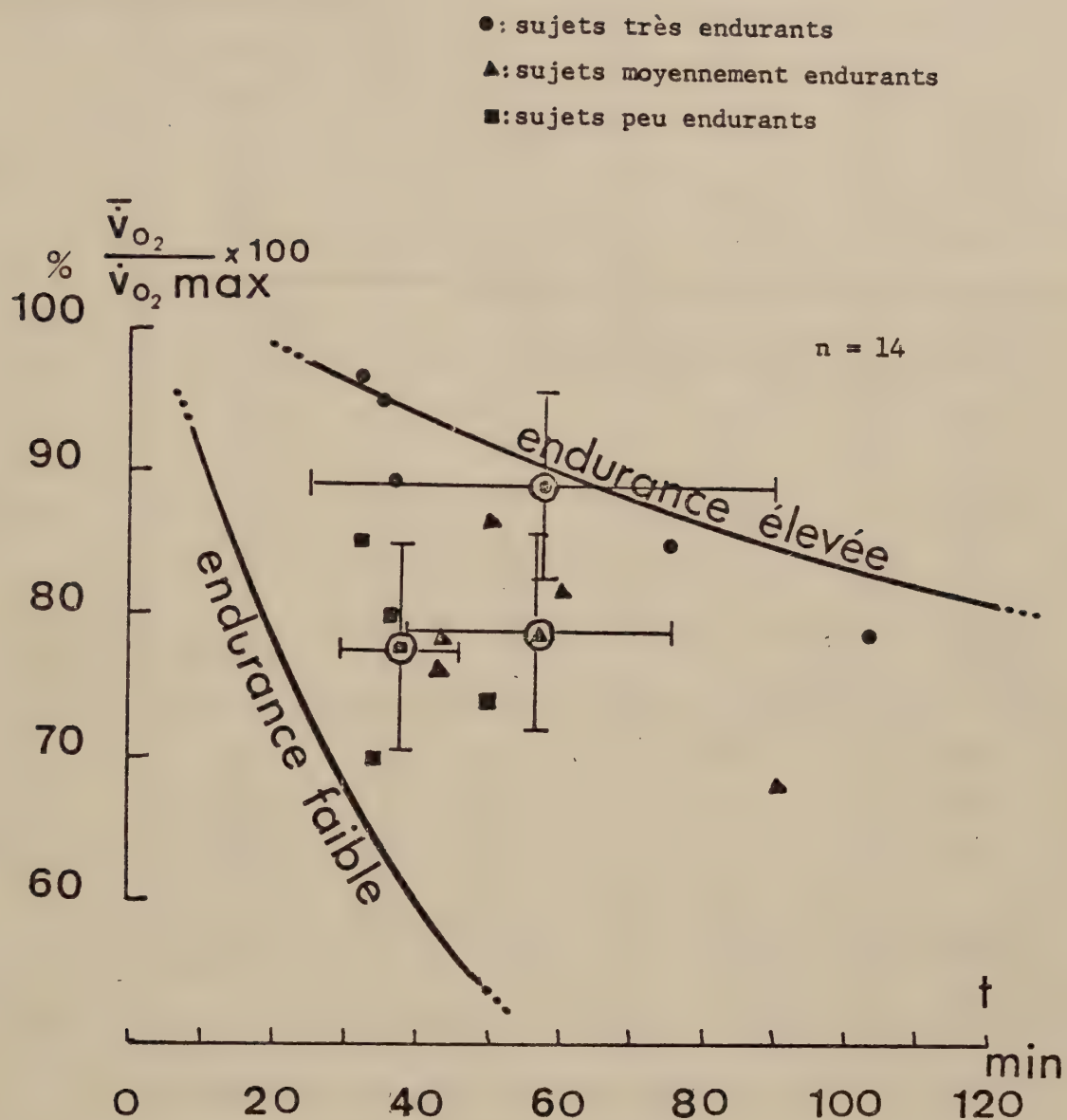


figure n° 4

Les moyennes sont représentées pour chaque groupe par :

- pour les sujets très endurants
- ▲ pour les sujets moyennement endurants
- pour les sujets peu endurants

groupes	sujets	% du VO_2 max	durée de l'exercice min	acide lactique mg/100 ml
I	COU	78	106	
	CEL	88	36	35,5
	DUM	95	35	39,4
	SAV	97	33	
	MEL	85	75	54,0
	moyenne	88,6 ± 7,7	57 ± 32,5	43 ± 9,7
II	MEF	87	50	39
	WEL	67	90	34
	LAS	82	60	34,1
	MAR	76	42	21
	DUT	79	42	14
	moyenne	78,2 ± 7,4	57 ± 20,0	28,5 ± 10,4
III	DEL	70	32	36,7
	TUR	86	33	31,5
	DRA	80	37	60
	JOA	74	50	
	moyenne	77,5 ± 7,0	38 ± 8,3	42,7 ± 15,2

INTENSITE ET DUREE DE L'EXERCICE MUSCULAIRE
LACTATEMIE APRES EXERCICE

c) l'acide lactique

La mesure de la lactatémie après exercice montre des taux sensiblement identiques pour les groupes I ($43 \pm 9,7$ mg/100 ml) et III ($42,7 \pm 15,2$ mg/100 ml) ; le groupe II présente un taux inférieur ($28,5 \pm 10,4$ mg/100 ml), mais qui n'est pas significativement différent.

2) La ventilation

a) le débit ventilatoire

On note une augmentation significative ($P < 0,05$) de $\dot{V}_E$ entre la 5^{ème} minute et la fin de l'exercice pour l'ensemble des 14 sujets. Cette augmentation ($\Delta \dot{V}_E$) est plus importante pour le groupe I ($30,43 \pm 8,7$ l/min) que pour les groupes II ($20,41 \pm 5,1$ l/min) et III ($20,36 \pm 12,2$ l/min).

La figure n°6 représente l'évolution temporelle de $\dot{V}_E$ pour chaque groupe de sujets. En ordonnée sont représentées les moyennes des débits ventilatoires pour chaque groupe et en abscisse le temps correspondant respectivement à 5 minute, puis à 25 %, 50 %, 75 % et 100 % de la durée totale de l'exercice. Les courbes ainsi obtenues montrent que les débits ventilatoires des sujets du groupe I, qui travaillent en moyenne à 88 % de leur $\dot{V}_{O_2 \text{ max}}$, sont supérieurs à ceux des sujets des groupes III (77 % du $\dot{V}_{O_2 \text{ max}}$) et II (72 % du $\dot{V}_{O_2 \text{ max}}$).

La figure n° 5 représente l'évolution temporelle de $\dot{V}_E$ pour 3 sujets du groupe I, (COU), (CEL) et (MEL) choisis à titre d'exemple. Chez les 2 sujets (COU) et (MEL), on note après la rapide augmentation initiale de $\dot{V}_E$ un léger fléchissement à partir de la 15^{ème} minute, suivi vers la 40^{ème} minute d'une lente reprise de l'augmentation. Ce décrochage n'est pas observé pour le sujet (CEL) qui présente une augmentation beaucoup plus importante de $\dot{V}_E$, mais pour une durée d'exercice plus courte.

b) le volume courant

On observe entre la 5^{ème} minute et la fin de l'exercice une diminution non significative de V_T , qui est plus importante pour le groupe II ($0,45 \pm 0,25$ l BTPS) que pour les groupes I ($0,37 \pm 0,7$ l BTPS) et III ($0,14 \pm 0,3$ l BTPS).

On note que le volume courant moyen ($\overline{V_T}$) est plus important pour le groupe I ($3,07 \pm 0,7$ l BTPS) que pour les groupes II ($2,51 \pm 0,2$ l BTPS) et III ($2,48 \pm 0,3$ l BTPS), mais il n'y a pas de différence significative entre les 3 groupes.

Les valeurs concernant $\dot{V}_E$ et V_T sont représentées dans le tableau n°4 sous forme de moyennes pour les 3 groupes de sujets.

c) la fréquence respiratoire

Comme le montre le tableau n°4, la fréquence respiratoire à 5 minutes d'exercice est plus élevée pour le groupe III (36 ± 5 cycles/min) que pour les groupes I (29 ± 7 cycles/min) et II (29 ± 6 cycles/min).

A la fin de l'exercice, la fréquence respiratoire f est légèrement plus élevée dans les groupes I (46 ± 2 cycles/min) et III (46 ± 7 cycles/min) que dans le groupe II (43 ± 11 cycles/min). D'autre part, cette augmentation de f (f) entre la 5^{ème} minute et la fin de l'exercice est plus importante pour le groupe I (17 ± 3 cycles/min) que pour les groupes II (14 ± 8 cycles/min) et III (10 ± 6 cycles/min).

TABLEAU N° 4

groupes	I	II	III
$\dot{V}_E$ 5 min l/min BTPS	101,0 $\pm$ 26	77,6 $\pm$ 10,7	90,5 $\pm$ 10,6
$\dot{V}_E$ fin l/min BTPS	131,5 $\pm$ 33	97,9 $\pm$ 14	110,9 $\pm$ 14,3
$\overline{\dot{V}_E}$ l/min BTPS	116,2 $\pm$ 29	87,7 $\pm$ 12	100,7 $\pm$ 12
$\Delta \dot{V}_E$ l/min BTPS	30,4 $\pm$ 8,7	20,4 $\pm$ 5,1	20,3 $\pm$ 12,2
V_T 5 min l BTPS	3,26 $\pm$ 0,6	2,73 $\pm$ 0,3	2,55 $\pm$ 0,23
V_T fin l BTPS	2,89 $\pm$ 0,8	2,29 $\pm$ 0,2	2,41 $\pm$ 0,4
$\overline{V_T}$ l BTPS	3,07 $\pm$ 0,7	2,51 $\pm$ 0,2	2,48 $\pm$ 0,3
ΔV_T l BTPS	0,37 $\pm$ 0,7	0,45 $\pm$ 0,25	0,14 $\pm$ 0,3
f 5 min cycles/min	29 $\pm$ 7	29 $\pm$ 6	36 $\pm$ 5
f fin cycles/min	46 $\pm$ 2	43 $\pm$ 11	46 $\pm$ 7
Δf cycles/min	17 $\pm$ 3	14 $\pm$ 8	10 $\pm$ 6

PARAMETRES RESPIRATOIRES

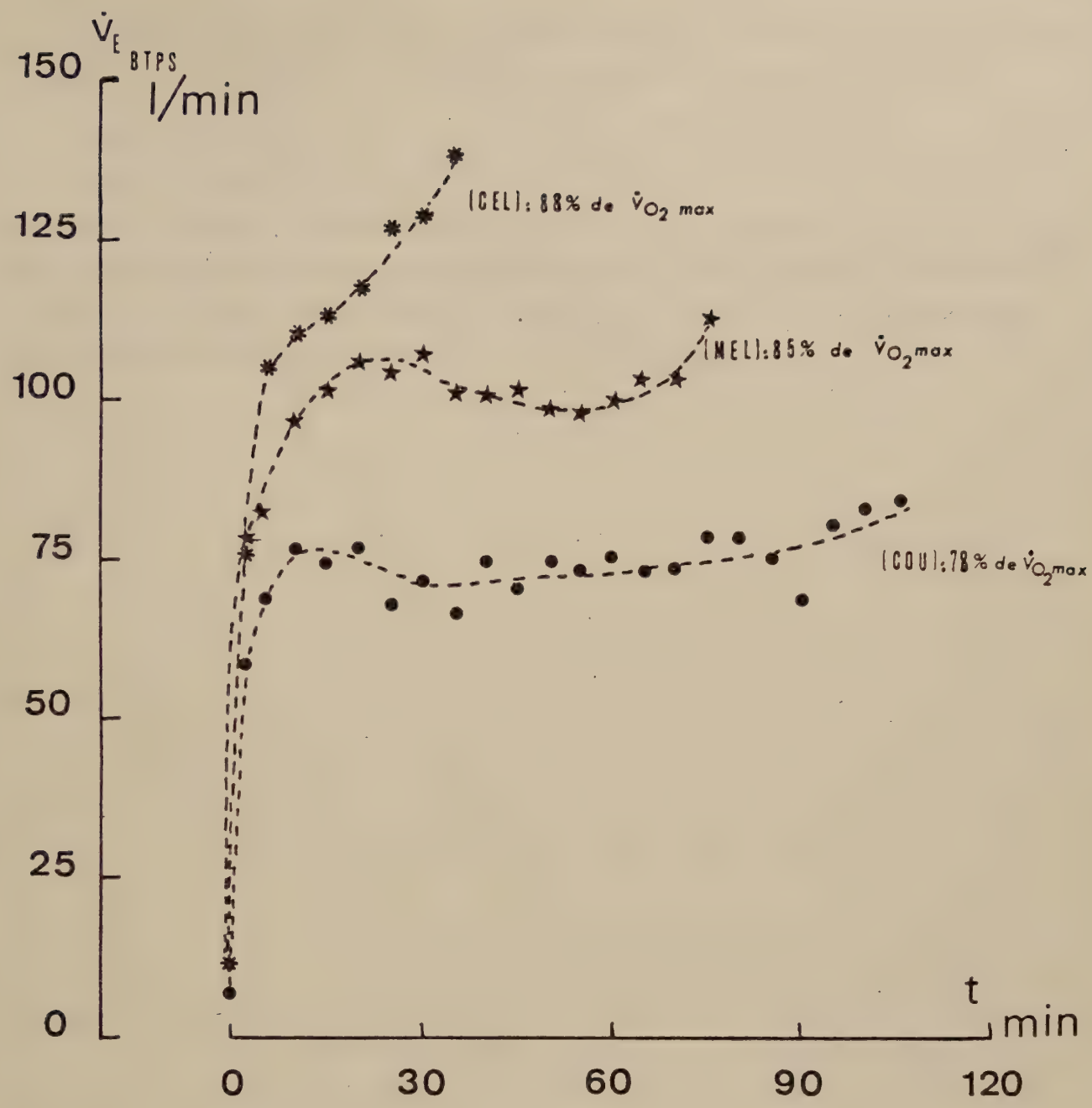


figure n° 5

Evolution temporelle de $\dot{V}_E$ pour 3 sujets du groupe I travaillant avec des puissances relatives différentes

La figure n° 7 montre l'évolution temporelle de f (toutes les 5 min) pendant l'exercice musculaire pour 3 sujets pris chacun dans un groupe différent :

- (COU) du groupe I
- (MEF) du groupe II
- (DEL) du groupe III

On observe au début du travail une augmentation de f d'autant plus rapide que le sujet est moins endurant, puis une stabilisation, voire une légère diminution de f . Dans les 10 dernières minutes de l'exercice, on note pour les 3 sujets une augmentation brutale de f jusqu'à la fin de l'exercice.

figure n° 6

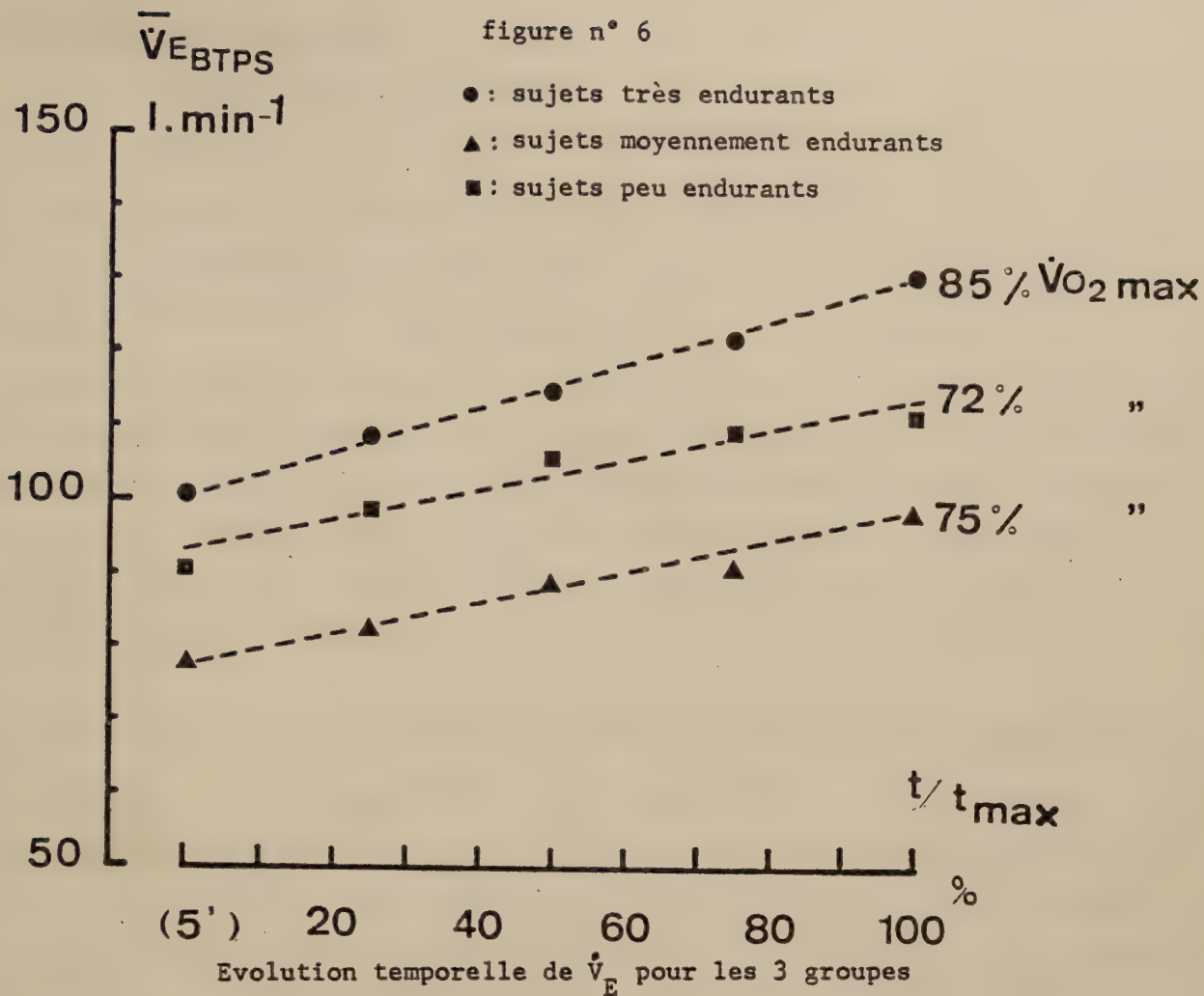
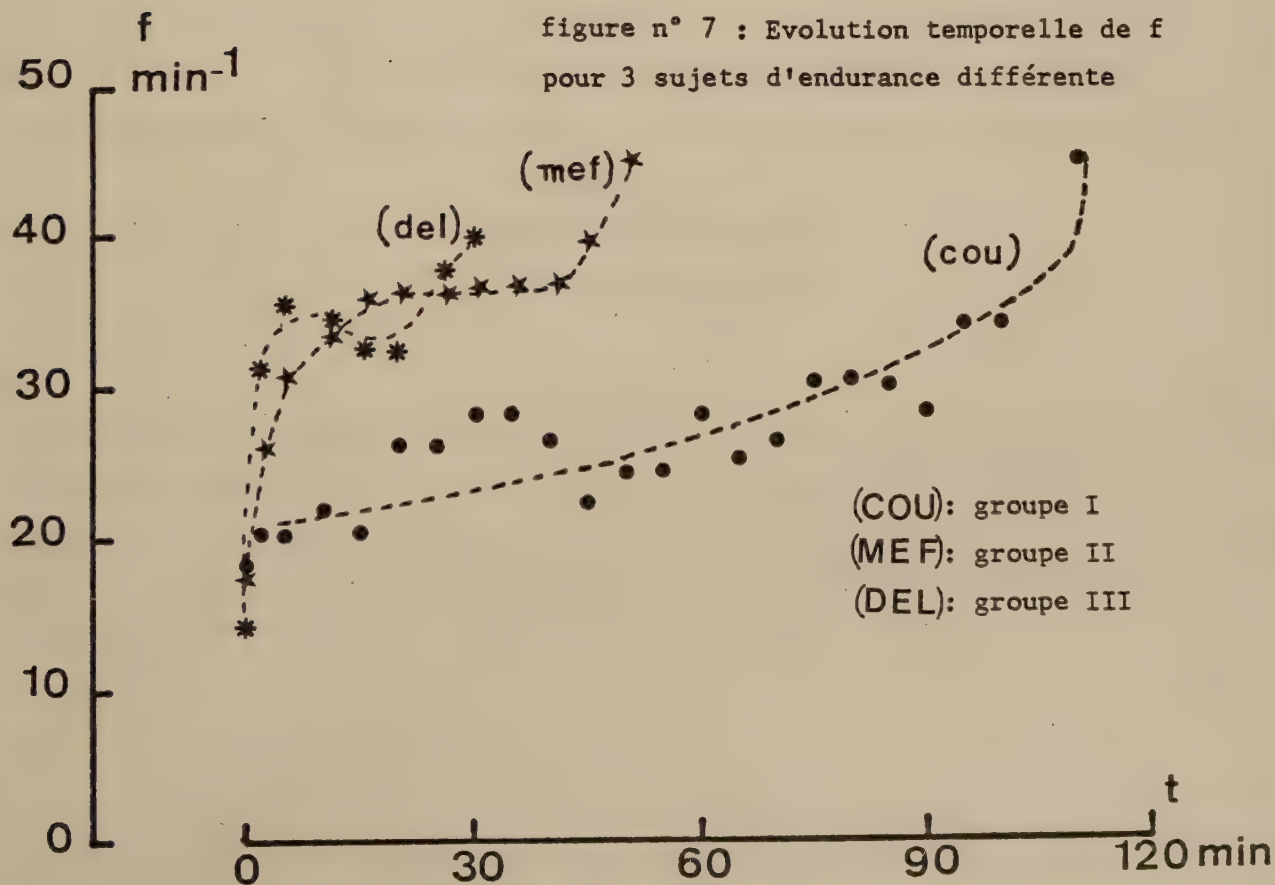


figure n° 7 : Evolution temporelle de f pour 3 sujets d'endurance différente



3) Le métabolisme énergétique

a) la consommation d'oxygène

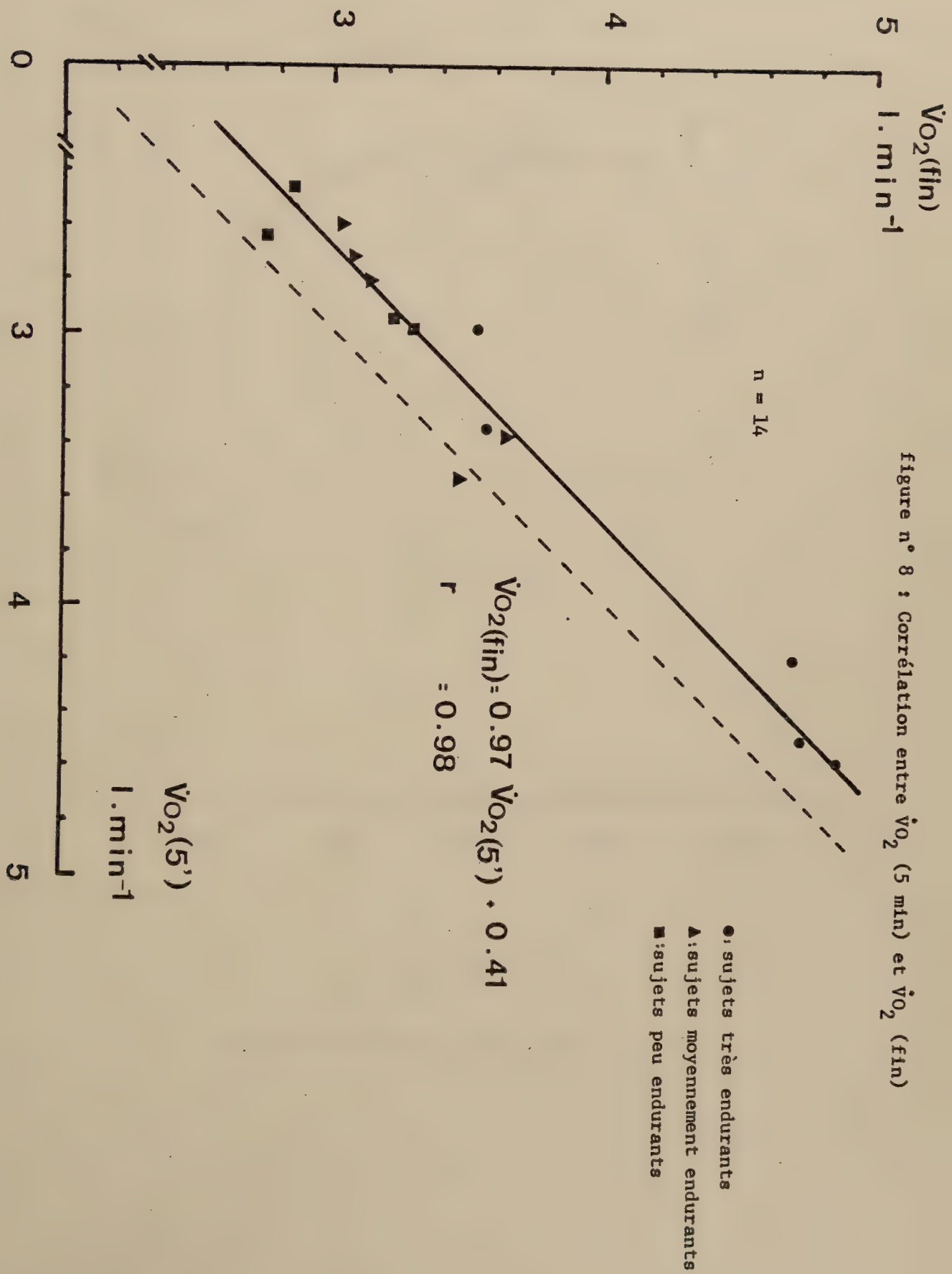
Comme le montre le tableau n°5, on note une élévation non significative de $\dot{V}O_2$ entre la 5^{ème} minute et la fin de l'exercice pour les trois groupes. La figure n°8 représente la corrélation ($r = 0,98$) existant entre $\dot{V}O_2$ à 5 minutes et $\dot{V}O_2$ en fin d'exercice pour chaque sujet. $\dot{V}O_2$ (fin) est obtenu en fonction de $\dot{V}O_2$ (5 min) par l'équation : $\dot{V}O_2$ (fin) = $0,97 \dot{V}O_2$ (5 min) + 0,41

Les valeurs de $\dot{V}O_2$ à 5 minutes sont plus élevées pour le groupe I ($3,93 \pm 0,72$ l/min) que pour les groupes II ($3 \pm 0,42$ l/min) et III ($2,75 \pm 0,25$ l/min). Cette différence est retrouvée pour $\dot{V}O_2$ en fin d'exercice qui est également plus élevé pour le groupe I ($4,28 \pm 0,67$) que pour les groupes II ($3,27 \pm 0,27$ l/min) et III ($3,03 \pm 0,27$ l/min). Par conséquent $\dot{V}O_2$ du groupe I est plus élevé ($4,10 \pm 0,69$ l/min) que $\dot{V}O_2$ des groupes II ($3,14 \pm 0,34$ l/min) et III ($2,90 \pm 0,25$ l/min).

groupes	$\dot{V}O_2$ (5 min) l/min	$\dot{V}O_2$ (fin) l/min	$\overline{\dot{V}O_2}$ l/min
I	$3,93 \pm 0,72$	$4,28 \pm 0,67$	$4,10 \pm 0,69$
II	$3,00 \pm 0,42$	$3,27 \pm 0,27$	$3,14 \pm 0,34$
III	$2,75 \pm 0,25$	$3,03 \pm 0,27$	$2,90 \pm 0,25$

TABLEAU N°5
CONSOMMATION D'OXYGENE
AU COURS DE L'EXERCICE

La figure n°9 montre à titre d'exemple l'évolution temporelle de $\dot{V}O_2$ (minute par minute) jusqu'à la fin de l'exercice pour le sujet (MEF). On observe une augmentation importante de $\dot{V}O_2$ au cours des 5 premières minutes de 0,350 l/min à 2,750 l/min, puis une élévation beaucoup plus progressive et régulière durant les 45 autres minutes allant de 2,75 l/min à 3,10 l/min.



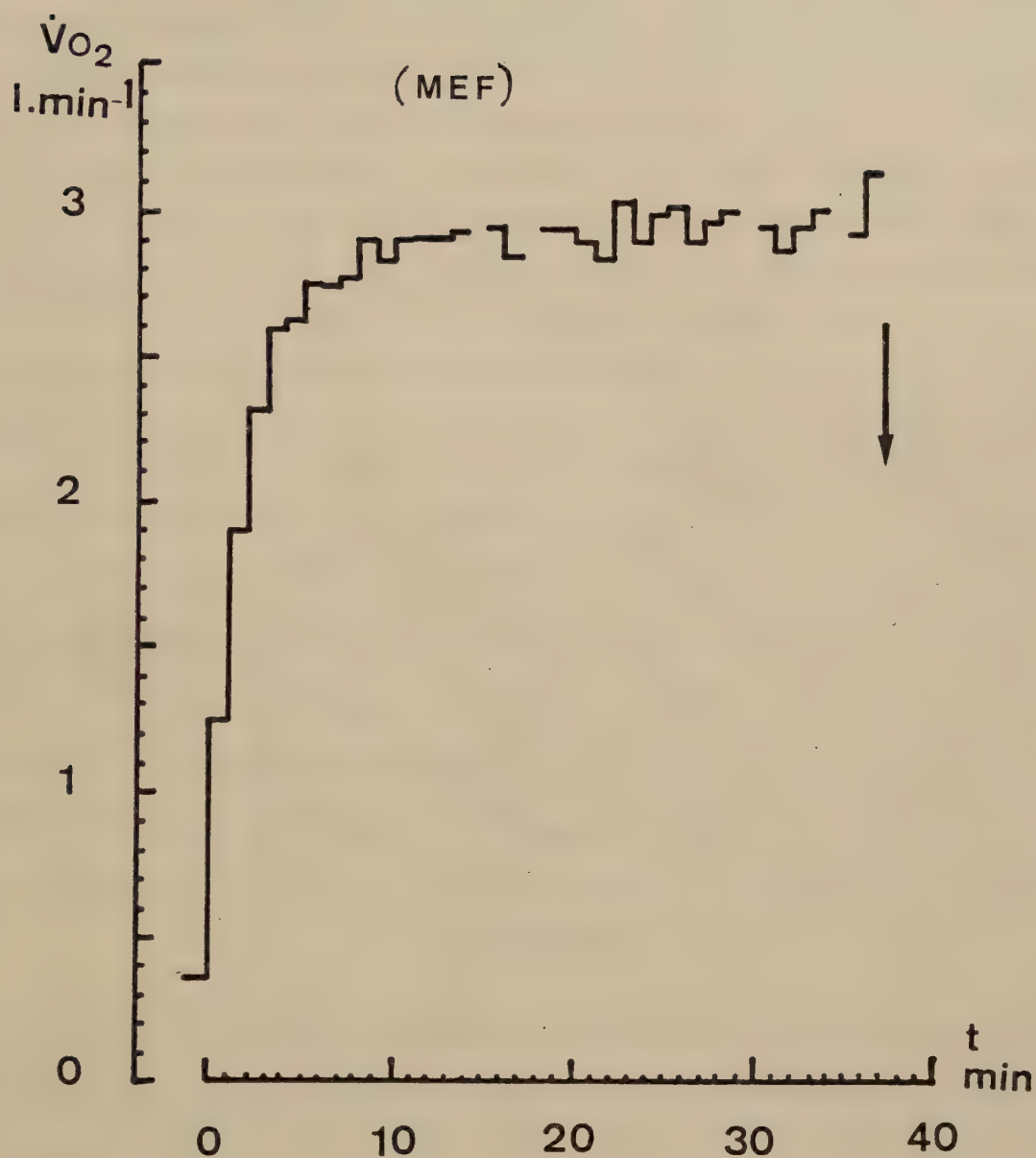


figure n° 9

Evolution temporelle de $\dot{V}O_2$ pour un sujet

b) le quotient respiratoire

Le quotient respiratoire est le témoin du degré de participation des glucides, des lipides et des protides dans le métabolisme énergétique. Comme le montre le tableau n°6, les QR moyens ($\overline{QR}$) des groupes I ($0,96 \pm 0,07$) et II ($0,95 \pm 0,06$) sont significativement plus bas ($P < 0,05$) que le $\overline{QR}$ du groupe III ($1,05 \pm 0,04$). Si on étudie l'évolution du QR entre la 5^{ème} minute et la fin de l'exercice, on note une diminution mais non significative pour les 3 groupes.

Les valeurs obtenues après le calcul des pourcentages d'énergie fournie par les différents substrats (voir tableau n°6) montrent que les glucides fournissent environ 80 % de l'énergie pour les groupes I et II, alors que la quasi totalité de l'énergie est fournie par les glucides pour le groupe III.

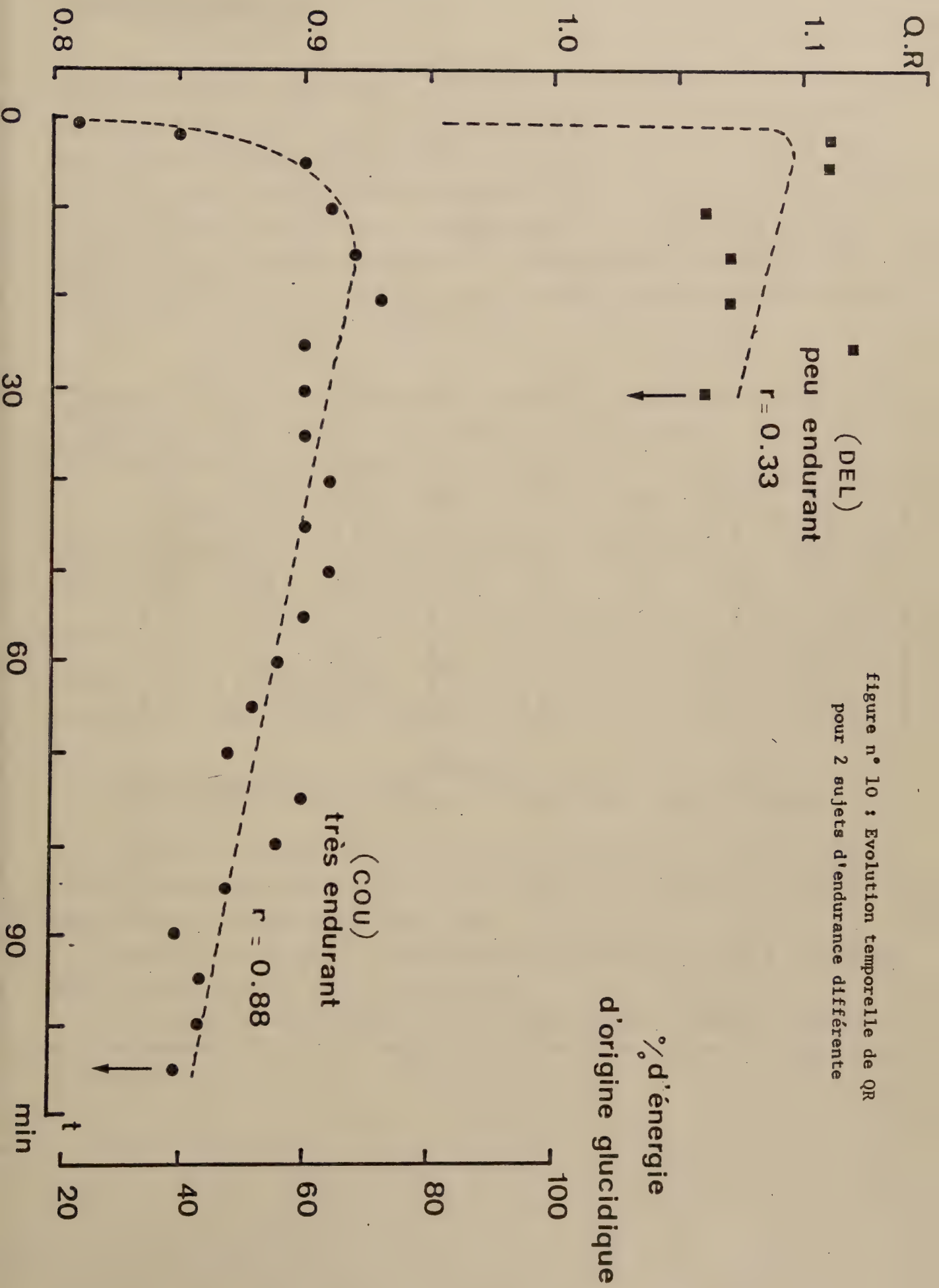
groupes	QR 5 min	QR fin	$\overline{QR}$	pourcentage d'énergie fournie par les différents substrats		
				glucides	lipides	protides
I	$0,98 \pm 0,07$	$0,93 \pm 0,08$	$0,96 \pm 0,07$	$80,35 \pm 26,34$	$18,10 \pm 26,40$	$1,55 \pm 0,21$
II	$0,99 \pm 0,09$	$0,91 \pm 0,03$	$0,95 \pm 0,06$	$78,65 \pm 21,30$	$20,40 \pm 21,27$	$1,00 \pm 0,43$
III	$1,07 \pm 0,03$	$1,04 \pm 0,06$	$1,05 \pm 0,04$	$98,13 \pm 0,92$	$0,38 \pm 0,75$	$1,50 \pm 0,20$

TABLEAU N°6

La figure n°10 reproduit l'évolution temporelle de QR ainsi que le pourcentage d'énergie fournie par les glucides pour deux sujets d'endurance différente :

- le sujet (COU) appartient au groupe I ; on note une bonne corrélation ($r = 0,88$) entre le QR et la durée de l'exercice. Il existe une diminution du pourcentage d'énergie d'origine glucidique au cours de l'exercice (de 70 % au début de l'exercice on passe à 40 % en fin d'exercice), ceci étant le reflet d'une augmentation de la participation des lipides dans la fourniture énergétique au cours de l'exercice.

- le sujet (DEL) appartient au groupe III, son QR est d'emblée supérieur à 1 ($1,11$) témoin d'une hyperventilation relative. Le QR s'abaisse durant l'exercice ($1,06$ en fin d'exercice) et il n'y a pas de corrélation ($r = 0,33$) entre le QR et la durée de l'exercice, du fait de cette hyperventilation relative. Durant tout l'exercice, 100 % de l'énergie est d'origine glucidique.



4) La fréquence cardiaque

Comme le montre la figure n°11, les fréquences cardiaques au repos sont plus basses pour le groupe I ($66 \pm 15,3$ bat/min) que pour les groupes II ($74 \pm 18,1$) et III ($76 \pm 11,6$). Au bout de 2 minutes d'exercice, F est plus basse pour le groupe III ($133 \pm 12,5$) et plus élevée pour les groupes I ($149 \pm 11,3$) et II ($158 \pm 5,4$). Plus la durée de l'exercice augmente, plus les différences entre les moyennes des fréquences cardiaques pour les 3 groupes sont faibles. Les moyennes des fréquences cardiaques n'ont été calculées que jusqu'à la 30^{ème} minute, car par la suite les moyennes sont faussées du fait de l'arrêt de l'exercice par certains sujets. (Voir tableau n°7).

temps min groupes	0	2	5	10	15	20	25	30
I	66 $\pm 15,3$	149 $\pm 11,3$	160 $\pm 11,8$	167 $\pm 11,5$	172 $\pm 11,4$	175 $\pm 11,8$	179 $\pm 12,1$	181 $\pm 11,6$
II	74 $\pm 18,1$	158 $\pm 5,4$	166 $\pm 6,4$	172 $\pm 6,1$	175 $\pm 4,3$	178 $\pm 2,6$	181 $\pm 3,5$	183 $\pm 3,0$
III	76 $\pm 11,6$	133 $\pm 12,5$	156 $\pm 4,4$	165 $\pm 2,2$	167 $\pm 3,3$	172 $\pm 3,0$	177 $\pm 6,2$	180 $\pm 6,2$

TABLEAU N°7

EVOLUTION TEMPORELLE DE F POUR LES 3 GROUPES JUSQU'A LA 30^{ème} MINUTE

On note que les fréquences cardiaques enregistrées à la fin de l'exercice sont très proches et parfois égales à F max (voir tableau n°8). En moyenne F à la fin de l'exercice représente 97 % de F max.

Seuls les sujets (DUT) et (DRA) terminent l'exercice avec une F très inférieure à leur F max : 90,7 et 92 % de F max.

Les sujets des groupes II et III finissent l'exercice avec une F qui représente en moyenne 96 à 97 % de F max, alors que les sujets du groupe I sont à près de 99 % de F max.

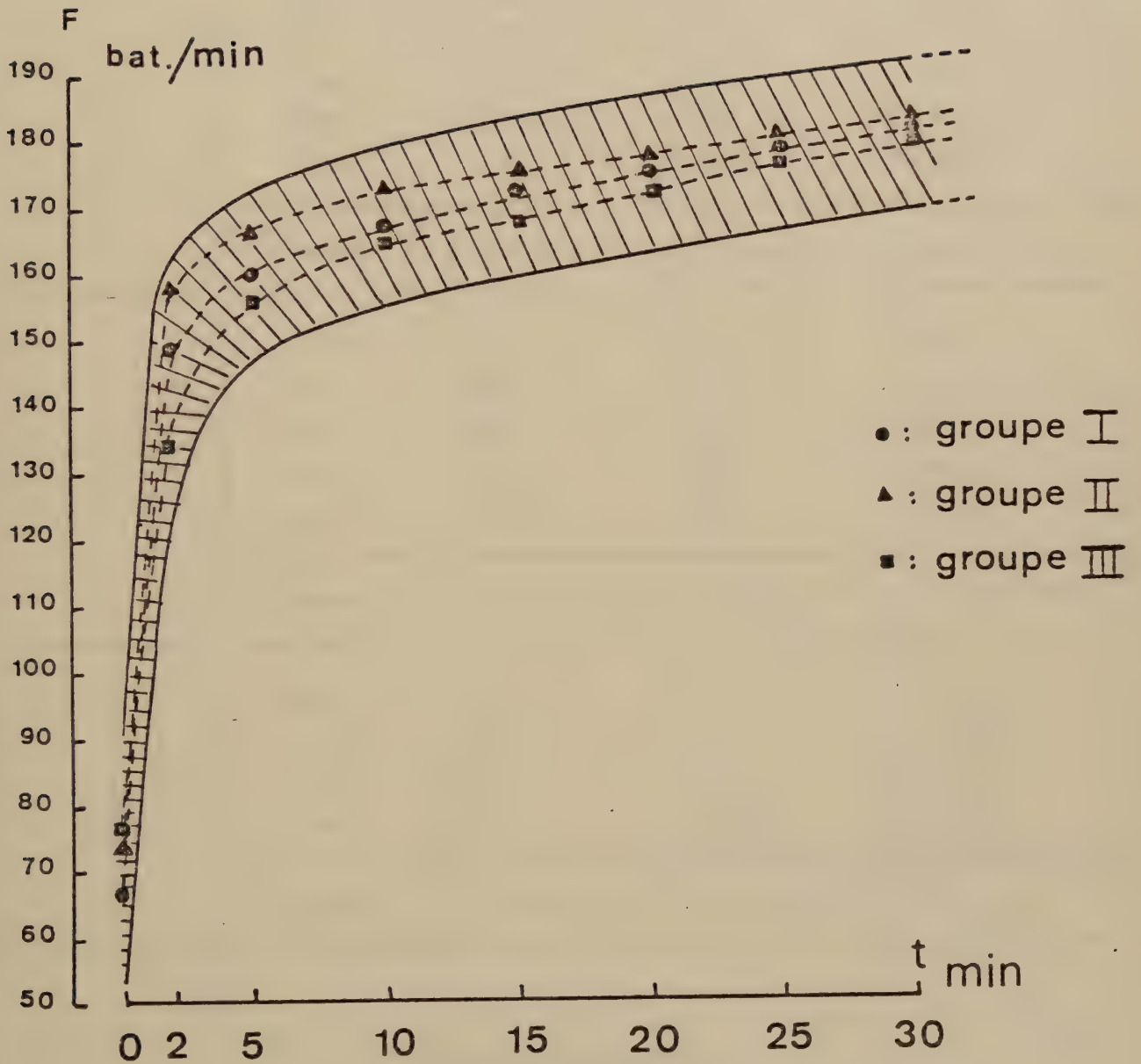


figure n° 11

Evolution temporelle de F pour les 3 groupes jusqu'à la 30^{ème} minute

TABLEAU N° 8

groupes	sujets	F en fin d'exercice bat/min	F max bat/min	$\frac{F(\text{fin})}{F \text{ max}} \times 100$
I	COU	196	197	99,5
	CEL	192	194	99,0
	DUM	197	200	98,5
	SAV	176	181	97,2
	MEL	179	180	99,5
	moyenne	$188 \pm 9,8$	$190,4 \pm 9,3$	$98,7 \pm 0,9$
II	MEF	190	199	95,5
	WEL	214	214	100,0
	LAS	200	207	96,5
	MAR	180	189	95,2
	DUT	186	205	90,7
	moyenne	$194 \pm 13,3$	$202,8 \pm 9,4$	$95,6 \pm 3,3$
III	DEL	187	187	100,0
	TUR	185	192	96,3
	DRA	174	189	92,0
	JOA	195	196	99,5
	moyenne	$185,2 \pm 8,6$	$191 \pm 4,0$	$97 \pm 3,7$

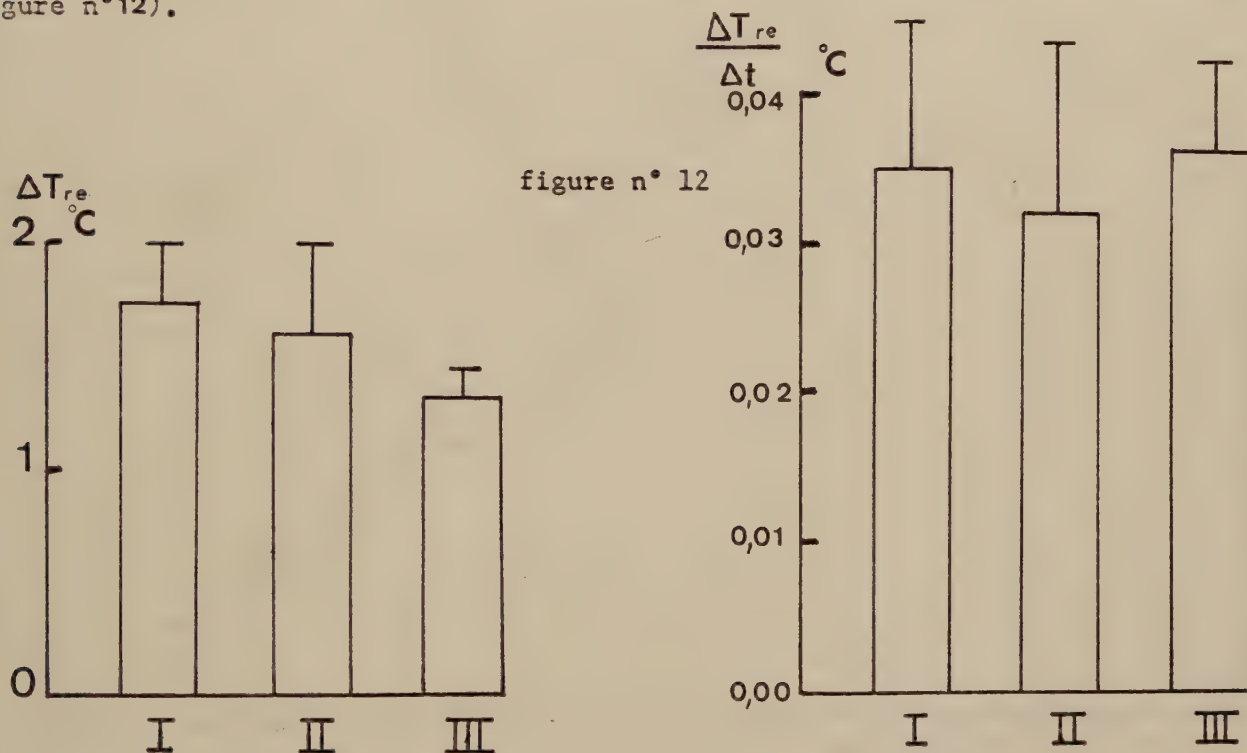
FREQUENCES CARDIAQUES
EN FIN D'EXERCICE

5) Le bilan thermique

a) la température rectale

Tre au début (Tre_1) est sensiblement identique pour les 3 groupes aux environs de $37,5^{\circ}\text{C}$. Par contre, Tre finale (Tre_2) est bien plus élevée pour le groupe I ($39,34 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$) que pour les groupes II ($38,91 \pm 0,55^{\circ}\text{C}$) et III ($38,67 \pm 0,32^{\circ}\text{C}$). Cette augmentation de Tre est hautement significative ($P < 0,01$) entre le début et la fin de l'exercice pour les 3 groupes de sujets. Les variations les plus importantes sont observées pour les groupes I ($\Delta Tre = 1,72 \pm 0,34^{\circ}\text{C}$) et II ($\Delta Tre = 1,66 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$). Pour le groupe III la variation est moindre ($\Delta Tre = 1,33 \pm 0,1^{\circ}\text{C}$). Ces valeurs sont rapportées dans le tableau n°9 et sur la figure n°12

Si on ramène la variation absolue à la minute ($\frac{\Delta Tre}{\Delta t}$), on note que les 3 groupes ont des valeurs assez semblables aux environs de $0,035^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (voir la figure n°12).



La figure n°13 représente l'évolution temporelle de Tre pour 3 sujets d'endurance différente.

Le sujet (MEL) qui appartient au groupe I termine l'exercice dont l'intensité est de 85 % de $\dot{V}O_2$ max avec une Tre finale de $39,45^{\circ}\text{C}$. Les deux autres sujets ont une Tre finale bien inférieure ($38,5^{\circ}\text{C}$). Il faut noter cependant que le sujet (DEL) fournit une puissance de travail (70 % de $\dot{V}O_2$ max) nettement plus basse que celle du sujet (MEF) : 87 % de $\dot{V}O_2$ max.

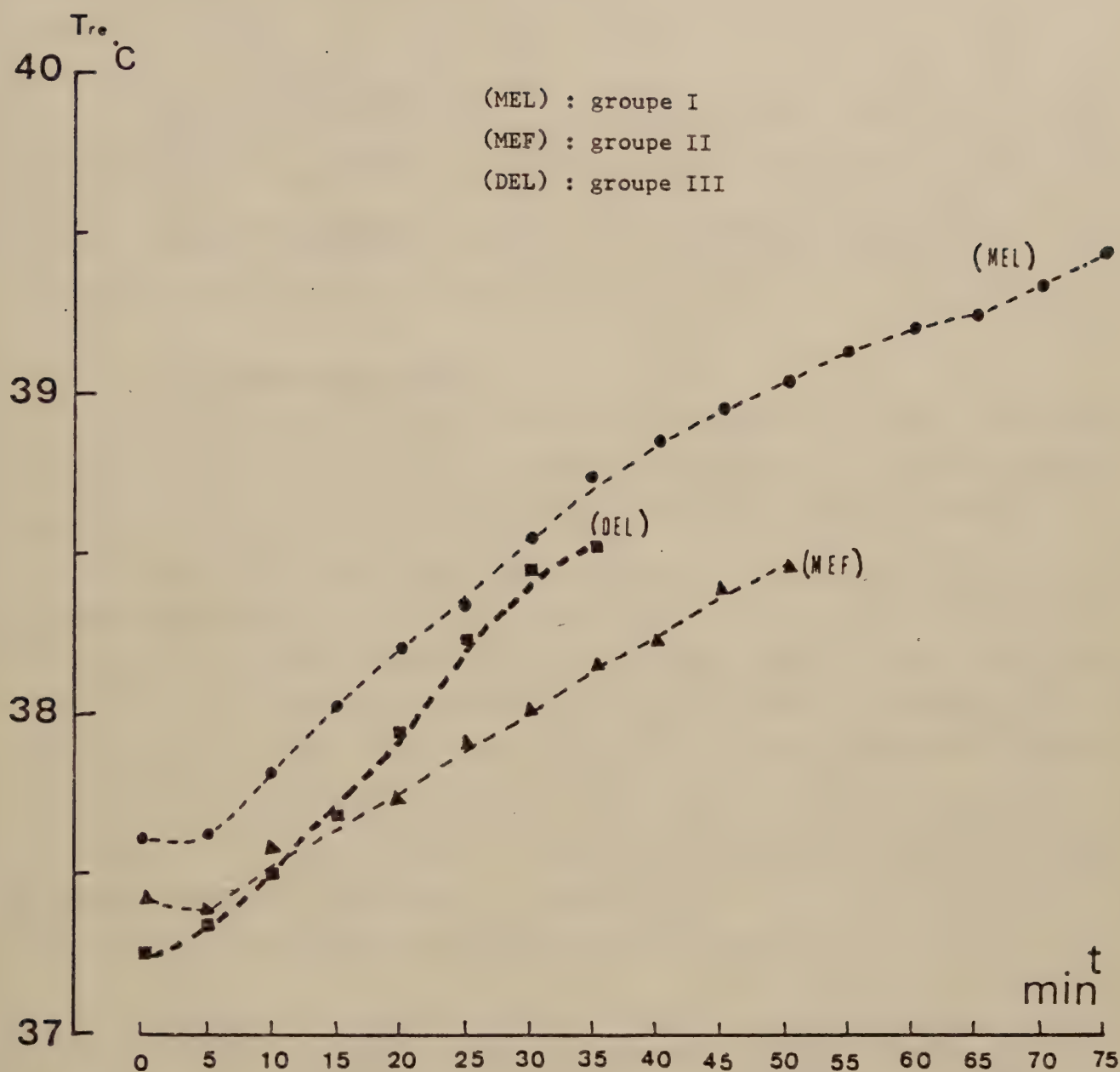


figure n° 13

Evolution temporelle de T_{re} pour 3 sujets d'endurance différente

TABLEAU N° 9
EVOLUTION DES TEMPERATURES RECTALES

groupes	Tre ₁ °C	Tre ₂ °C	ΔTre °C	% ΔTre	$\frac{\Delta Tre}{\Delta t}$ °C/min
I	37,64 ± 0,22	*** 39,34 ± 0,30	1,72 ± 0,34	4,56 ± 0,9	0,035 ± 0,011
II	37,25 ± 0,45	*** 38,91 ± 0,55	1,66 ± 0,40	4,46 ± 1,0	0,032 ± 0,013
III	37,35 ± 0,24	*** 38,67 ± 0,32	1,33 ± 0,10	3,55 ± 0,2	0,036 ± 0,006

b) la température cutanée

La figure n°14 représente les évolutions temporelles de Tsk pour les 3 groupes de sujets. On note pour la plupart des sujets une diminution de Tsk au cours des 5 premières minutes, et par la suite une augmentation très progressive de Tsk jusqu'à la fin de l'exercice.

Les valeurs de Tsk pour chaque groupe sont représentées dans le tableau n°10 au repos, à 5 minute et à la fin de l'exercice.

- au repos, Tsk est peu différent pour les 3 groupes : 31,96 ± 0,42°C pour le groupe I; 31,89 ± 0,81°C pour le groupe II et 31,89 ± 0,6°C pour le groupe III.
- après 5 minutes d'exercice, la diminution de Tsk est plus marquée pour le groupe III (0,96°C) que pour les groupes I (0,63°C) et II (0,41°C).
- à la fin de l'exercice, les valeurs de Tsk ne sont pas significativement différentes entre les 3 groupes : 31,28 ± 0,9°C pour le groupe I; 31,63 ± 0,97°C pour le groupe II et 31,85 ± 0,53°C pour le groupe III.
- Tsk se situant aux environs de 31,50°C pour les 3 groupes.

groupes	Tsk(repos) °C	Tsk(5 min) °C	Tsk(fin) °C	$\overline{Tsk}$ °C
I	31,96 ± 0,42	31,33 ± 0,71	31,28 ± 0,90	31,34 ± 0,52
II	31,89 ± 0,81	31,58 ± 0,52	31,63 ± 0,97	31,61 ± 0,92
III	31,89 ± 0,60	30,92 ± 0,40	31,85 ± 0,53	31,45 ± 0,41

TABLEAU N° 10
EVOLUTION DES TEMPERATURES CUTANÉES

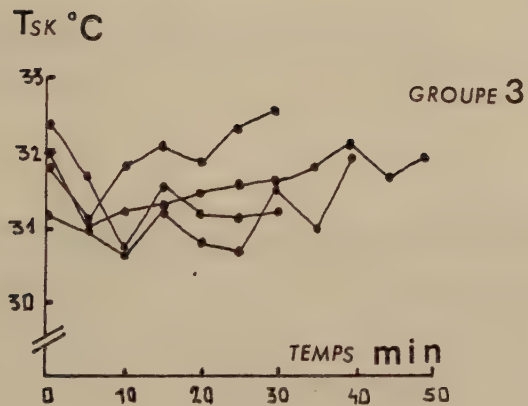
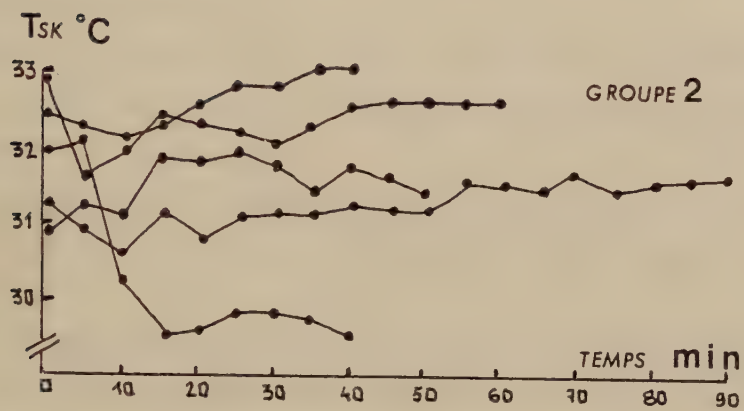
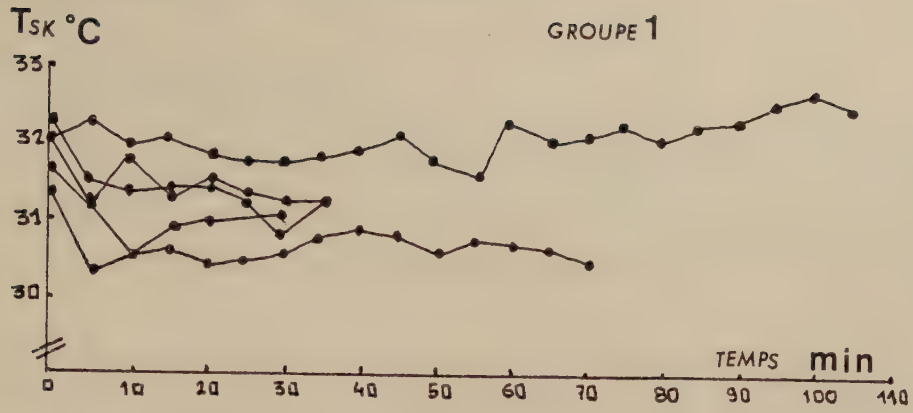


figure n° 14

Evolutions temporelles de T_{sk} pour les 3 groupes de sujets

6) Le bilan biologique sanguin et urinaire

a) le ionogramme sanguin

- il n'y a pas de variation significative après l'exercice en ce qui concerne $[Na^+]$, $[K^+]$, $[Cl^-]$, $[Mg^{++}]$ et la glycémie pour les 3 groupes. L'osmolalité plasmatique est augmentée après l'exercice de façon significative ($P < 0,05$) pour l'ensemble des sujets. L'azotémie est également augmentée, mais de façon non significative.
- il existe une augmentation significative de l'hématocrite ($P < 0,05$) pour les groupes II et III ; par contre le groupe I ne présente pas d'augmentation significative après l'exercice.
- on note une augmentation très significative ($P < 0,01$) des protéines après l'exercice pour les trois groupes.
- si on prend l'ensemble des sujets, on note une augmentation significative de la créatininémie ($P < 0,05$) qui est retrouvée pour les groupes II et III mais non pour le groupe I.
- il y a une diminution significative ($P < 0,05$) de la réserve alcaline après l'exercice pour les 3 groupes avec un effondrement plus marqué pour les sujets moins endurants.
- on note une augmentation de la calcémie à la limite de la signification ($P < 0,05$) pour le groupe III, l'augmentation n'étant pas significative pour les groupes I et II.
- en revanche, il existe une augmentation très significative pour les 3 groupes des ions phosphores ($P < 0,01$).

Les valeurs des composantes du ionogramme sanguin sont représentées dans les tableaux n° 11 et 12 .

b) le ionogramme urinaire (voir tableau n°13)

Il n'y a pas de variation significative après exercice pour les 3 groupes de sujets en ce qui concerne $[Na^+]$, $[K^+]$, $[Cl^-]$, l'urée et l'osmolalité urinaire. On note cependant une diminution du rapport Na/K après exercice pour les 3 groupes, mais qui n'est pas significative. Ce rapport passe de 1,8 avant exercice à 1,3 après exercice pour le groupe I; de 2,1 à 1,9 pour le groupe II et de 3,1 à 2 pour le groupe III.

TABLEAU N° 11

groupes		I	II	III
Hématocrite ₁	%	46,75 ± 1,9	46,75 ± 0,7	44,50 ± 0,3
Hématocrite ₂	%	48,00 ± 1,9	49,50 ± 0,6 *	48,00 ± 1,4 *
% Δ Hématocrite		2,7 ± 1	5,6 ± 4	7,6 ± 5
[Protéines] ₁	g/l	72,50 ± 2,2	75,75 ± 3,4	71,12 ± 2,2
[Protéines] ₂	g/l	77,90 ± 1,8 **	81,37 ± 1,4 **	77,82 ± 3,0 **
%Δ[Protéines]		7,46 ± 2,3	7,55 ± 5,5	9,40 ± 3,2
[Na ⁺] ₁	mEq/l	140,7 ± 2,8	144,4 ± 1,6	146,5 ± 7,0
[Na ⁺] ₂	mEq/l	144,8 ± 4,0	146,5 ± 2,0	145,5 ± 4,2
[K ⁺] ₁	mEq/l	4,60 ± 0,60	4,30 ± 0,10	4,11 ± 0,30
[K ⁺] ₂	mEq/l	4,34 ± 0,50	4,32 ± 0,22	4,10 ± 0,26
[Cl ⁻] ₁	mEq/l	100,7 ± 0,1	101,4 ± 1,0	100,0 ± 3,8
[Cl ⁻] ₂	mEq/l	102,4 ± 1,8	102,6 ± 1,5	100,5 ± 4,8
Azotémie ₁	g/l	0,39 ± 0,04	0,41 ± 0,10	0,33 ± 0,08
Azotémie ₂	g/l	0,44 ± 0,06	0,43 ± 0,14	0,34 ± 0,08
Osmolalité ₁	mOsm/kg	289,6 ± 1,6	296,2 ± 4,6	293,7 ± 3,4
Osmolalité ₂	mOsm/kg	296,6 ± 6,5 *	301,0 ± 10,0	299,7 ± 7,2

IONOGRAMME SANGUIN (première partie)

TABLEAU N° 12

groupes	I	II	III
$[\text{HCO}_3^-]_1$ mEq/l	$29,2 \pm 2,3$	$28,2 \pm 3,0$	$25,4 \pm 3,2$
$[\text{HCO}_3^-]_2$ mEq/l	$22,6 \pm 3,2^{**}$	$21,9 \pm 2,6^{**}$	$16,4 \pm 4,0^{**}$
% $\Delta[\text{HCO}_3^-]$	$22,8 \pm 6,8$	$21,5 \pm 16,0$	$35,9 \pm 10,8$
$[\text{créatinine}]_1$ mg/l	$12,0 \pm 2,0$	$12,1 \pm 2,8$	$11,2 \pm 1,4$
$[\text{créatinine}]_2$ mg/l	$14,4 \pm 1,6$	$16,4 \pm 2,0^*$	$13,5 \pm 1,4^*$
% $\Delta[\text{créatinine}]$	$21,0 \pm 13$	$37,5 \pm 18$	$21,0 \pm 20$
phosphorémie ₁ mg/l	$38,2 \pm 2,4$	$37,6 \pm 6,4$	$32,8 \pm 2,0$
phosphorémie ₂ mg/l	$51,6 \pm 3,8^{**}$	$51,1 \pm 8,0^{**}$	$49,0 \pm 7,0^{**}$
% phosphorémie	$38,0 \pm 12$	$38,0 \pm 30$	$49,5 \pm 20$
$[\text{Ca}^{++}]_1$ mg/l	$96,8 \pm 2,4$	$99,5 \pm 3,2$	$90,7 \pm 2,4$
$[\text{Ca}^{++}]_2$ mg/l	$98,4 \pm 3,8$	$103,5 \pm 2,6$	$96,5 \pm 4,8^*$
$[\text{Mg}^{++}]_1$ mg/l	$19,6 \pm 1,8$	$19,0 \pm 2,0$	$19,0 \pm 3,6$
$[\text{Mg}^{++}]_2$ mg/l	$19,7 \pm 1,8$	$20,2 \pm 1,4$	$21,3 \pm 3,4$
glycémie ₁ g/l	$1,01 \pm 0,16$	$0,94 \pm 0,16$	$1,12 \pm 0,18$
glycémie ₂ g/l	$1,25 \pm 0,36$	$0,96 \pm 0,22$	$0,94 \pm 0,20$

IONOGRAMME SANGUIN (deuxième partie)

TABLEAU N° 13

groupes	I	II	III
$[\text{Na}^+]_1$ mEq/l	108 ± 52	150 ± 75	75 ± 35
$[\text{Na}^+]_2$ mEq/l	90 ± 40	130 ± 70	116 ± 25
$[\text{K}^+]_1$ mEq/l	60 ± 35	69 ± 30	24 ± 10
$[\text{K}^+]_2$ mEq/l	71 ± 40	67 ± 25	58 ± 20
$\frac{[\text{Na}^+]}{[\text{K}^+]}_1$	1,8	2,1	3,1
$\frac{[\text{Na}^+]}{[\text{K}^+]}_2$	1,3	1,9	2
$[\text{Cl}^-]_1$ mEq/l	106 ± 40	154 ± 30	87 ± 32
$[\text{Cl}^-]_2$ mEq/l	80 ± 30	127 ± 35	141 ± 25
$[\text{urée}]_1$ g/l	$18,6 \pm 6,4$	$16,4 \pm 8,2$	$13,2 \pm 7,3$
$[\text{urée}]_2$ g/l	$17,3 \pm 7,5$	18 ± 7	$20,2 \pm 5$
osmolalité urinaire 1 mOsm/kg	815 ± 412	998 ± 175	576 ± 414
osmolalité urinaire 2 mOsm/kg	756 ± 402	859 ± 362	711 ± 420

IONOGRAMMES URINAIRES AVANT ET APRES EXERCICE

c) les hormones (voir tableau n°15)- neurophysine plasmatique :

Il y a une augmentation significative ($P < 0,05$) après exercice du taux plasmatique de la neurophysine, particulièrement pour le groupe I : $P < 0,01$; l'ensemble des sujets présente après exercice un taux correspondant à 2,6 fois le taux de base.

- ARP :

On note également une augmentation significative ($P < 0,05$) après exercice de l'ARP pour les 3 groupes ; l'ensemble des sujets présente après exercice un taux correspondant à 4,5 fois le taux de base.

- aldostérone plasmatique :

On observe pour cette hormone une augmentation très significative ($P < 0,01$) après exercice pour les 3 groupes ; l'ensemble des sujets présente après exercice un taux correspondant à 13,2 fois le taux de base. C'est le groupe I qui présente le coefficient de multiplication le plus important (21 fois le taux avant exercice).

- ADH plasmatique :

On observe une augmentation significative ($P < 0,05$) de cette hormone après exercice pour les 3 groupes. L'ensemble des sujets présente après exercice un taux d'ADH plasmatique correspondant à 4,8 fois le taux de base.

- ADH urinaire :

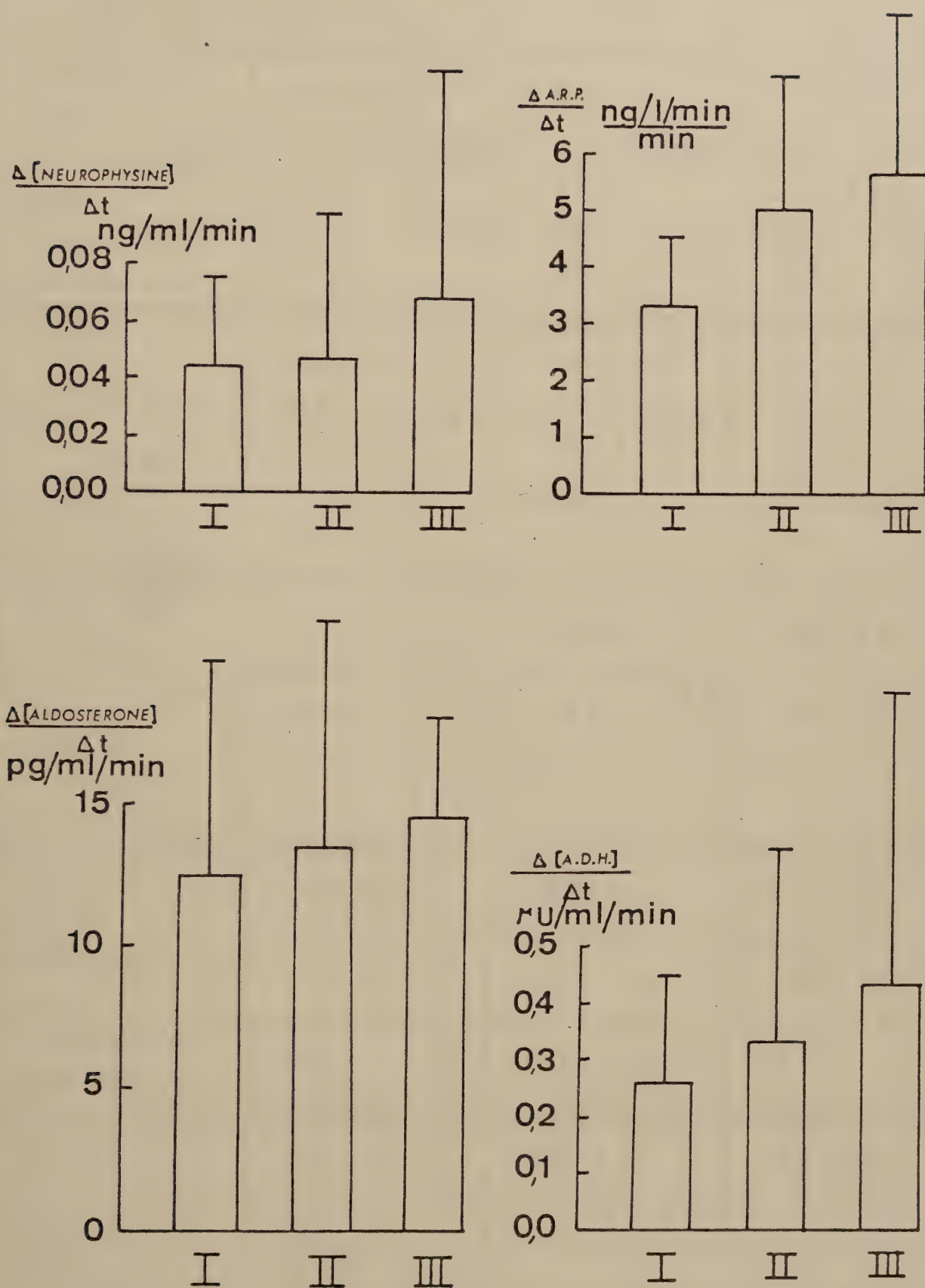
Il n'y a aucune variation significative après exercice pour les 3 groupes.

- la variation absolue des [hormones] ramenée à la minute (voir tableau n°14 et figure n°15) montre que les valeurs du groupe I sont toujours inférieures, mais de façon non significatives à celles des groupes II et III.

groupes	I	II	III
$\frac{\Delta[\text{neurophysine}]}{\Delta t}$ ng/ml/min	$0,043 \pm 0,03$	$0,047 \pm 0,05$	$0,068 \pm 0,08$
$\frac{\Delta \text{ARP}}{\Delta t}$ (ng/ml/min)/min	$3,35 \pm 1,15$	$5,03 \pm 2,33$	$5,64 \pm 2,77$
$\frac{\Delta[\text{aldostérone}]}{\Delta t}$ pg/ml/min	$12,28 \pm 7,34$	$13,26 \pm 7,65$	$14,50 \pm 3,48$
$\frac{\Delta[\text{ADH}]_p}{\Delta t}$ pU/ml/min	$0,26 \pm 0,19$	$0,33 \pm 0,34$	$0,43 \pm 0,51$

TABLEAU N° 14

figure n° 15



Variation absolue des taux hormonaux par minute

TABLEAU N°15

groupes	I	II	III
[neurophysine]1 ng/ml	$0,72 \pm 0,52$	$2,12 \pm 1$	$2 \pm 0,36$
[neurophysine]2 ng/ml	$2,72 \pm 0,52$ **	$5,38 \pm 3$ *	$4,40 \pm 2,4$ *
coefficient de multiplication	3,7	2,5	2,2
ARP 1 ng/l/min	$41,56 \pm 20$	$83,50 \pm 30$	$67,75 \pm 28$
ARP 2 ng/l/min	$227,5 \pm 120$ *	$355,4 \pm 144$ *	297 ± 204 *
coefficient de multiplication	5,5	4,2	4,4
[aldostérone]1 pg/ml	$27,2 \pm 12,6$	56 ± 40	$60,75 \pm 84,5$
[aldostérone]2 pg/ml	$575,8 \pm 150$ ***	729 ± 304 ***	$591,7 \pm 132$ ***
coefficient de multiplication	21	13	9,7
[ADH]plasm 1 µU/ml	$\leq 3,66 \pm 1$	$\leq 3,46 \pm 2,8$	$\leq 3,65 \pm 2,6$
[ADH]plasm 2 µU/ml	$12,66 \pm 5,9$ *	$19,67 \pm 12$ *	$18,2 \pm 10$ *
coefficient de multiplication	3,4	5,6	5
[ADH]urinaire 1 mU/h	$4,65 \pm 4,8$	$13,9 \pm 11$	$2,6 \pm 1,6$
[ADH]urinaire 2 mU/h	$12,3 \pm 6$	$11,7 \pm 9,5$	$2,3 \pm 1,4$

BILAN HORMONAL AVANT ET APRES EXERCICE

d) les clearances (tableau n°16)- la clearance de l'eau libre (C_{H_2O})

On note une diminution des débits urinaires ($\dot{V}$) après exercice pour les 3 groupes de sujets :

- pour le groupe I, $\dot{V}$ passe de $1,7 \pm 1,5$ ml/min avant exercice à $0,96 \pm 0,7$ ml/min pendant l'exercice.
- pour le groupe II, $\dot{V}$ passe de $1,33 \pm 1$ ml/min à $0,67 \pm 0,46$ ml/min.
- pour le groupe III, $\dot{V}$ passe de $2,43 \pm 1,8$ ml/min à $1,10 \pm 0,9$ ml/min.

En comparant C_{H_2O} avant exercice et C_{H_2O} pendant la période englobant l'exercice musculaire, on note une diminution de la négativité de C_{H_2O} pendant l'exercice pour les 3 groupes. Cette diminution est à la limite de la signification ($P < 0,05$) si on considère l'ensemble des sujets.

- la clearance de l'urée ($C_{urée}$)

On note une diminution significative ($P < 0,05$) de $C_{urée}$ pendant la période englobant l'exercice musculaire pour l'ensemble des sujets.

groupes	C_{H_2O} 1 ml/min	C_{H_2O} 2 ml/min	$C_{urée}$ 1 ml/min	$C_{urée}$ 2 ml/min
I	$- 1,48 \pm 1,6$	$- 0,78 \pm 0,8$	$55 \pm 10,2$	$27,6 \pm 6,8$ *
II	$- 3,05 \pm 2,4$	$- 0,83 \pm 1$	$35,6 \pm 18,2$	$16,6 \pm 5,7$ *
III	$- 1,21 \pm 0,8$	$- 0,85 \pm 1,2$	$55 \pm 2,6$	$40,2 \pm 10,8$ *

TABLEAU N°16

LES CLEARANCES DE L'EAU LIBRE ET DE L'UREE

7) Le bilan hydriquea) le volume plasmatique (voir tableau n°18)

On note après l'exercice une diminution du volume plasmatique pour tous les sujets ; cette diminution, exprimée en pourcentage ($\% \Delta VP$) est plus faible pour le groupe I ($4,87 \pm 2,16$ %) que pour les groupes II ($10,27 \pm 7$ %) et III ($12,92 \pm 8,36$ %).

Si on ramène la diminution absolue du volume plasmatique à la minute ($\frac{\Delta VP}{\Delta t}$), on note que le groupe I possède la valeur la plus basse ($3,38 \pm 2$ ml/min) par rapport au groupe II ($5,88 \pm 4,4$ ml/min) et surtout par rapport au groupe III ($12,3 \pm 7,8$ ml/min).

Dans la figure n°16, les sujets sont placés en fonction de la durée de l'exercice et de leur déficit plasmatique par minute. La courbe de régression est obtenue par l'équation :

$$Y = \frac{66,41}{X} + 32,59 \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} Y = \text{durée (min)} \\ X = \text{déficit plasmatique (g/min)} \end{array}$$

Malgré la mauvaise corrélation ($r = 0,67$), la réduction générale du temps d'exercice est d'autant plus marquée que la réduction de VP est importante.

b) la perte de poids

Les valeurs de la perte totale de poids durant l'exercice pour les 14 sujets sont représentées dans le tableau n°18.

La corrélation ($r = 0,94$) est excellente entre la perte de poids et la durée de l'exercice. La droite de régression est obtenue par l'équation :

$$Y = -55,63X + 15,41 \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} Y = \text{perte de poids (g)} \\ X = \text{durée (min)} \end{array}$$

La perte de poids par unité de temps est plus importante pour le groupe I ($16,45 \pm 2,23$ g/min) que pour les groupes II ($13,90 \pm 2,37$ g/min) et III ($11,60 \pm 1,62$ g/min). Cette différence est significative ($P < 0,05$) entre les groupes I et III.

c) pertes métaboliques respiratoires

Ces pertes, exprimées en g/min, sont regroupées dans le tableau n°17. Les valeurs les plus importantes sont observées pour les groupes I ($1,91 \pm 0,76$ g/min) et III ($1,86 \pm 0,36$ g/min) ; les pertes pour le groupe II sont plus faibles ($1,33 \pm 0,32$ g/min). Il n'y a pas de différence significative entre les 3 groupes.

La figure n°17 représente l'évolution des pertes métaboliques respiratoires ($\dot{MCO}_2 - \dot{MO}_2$) en fonction de la variation de $\dot{VO}_2$ au cours de l'exercice pour les 14 sujets. Les subdivisions du QR sont représentées sur cette figure de 0,7 à 1,2.

TABEAU N°17

groupes	pertes métaboliques respiratoires g/min
I	$1,91 \pm 0,76$
II	$1,33 \pm 0,32$
III	$1,86 \pm 0,36$

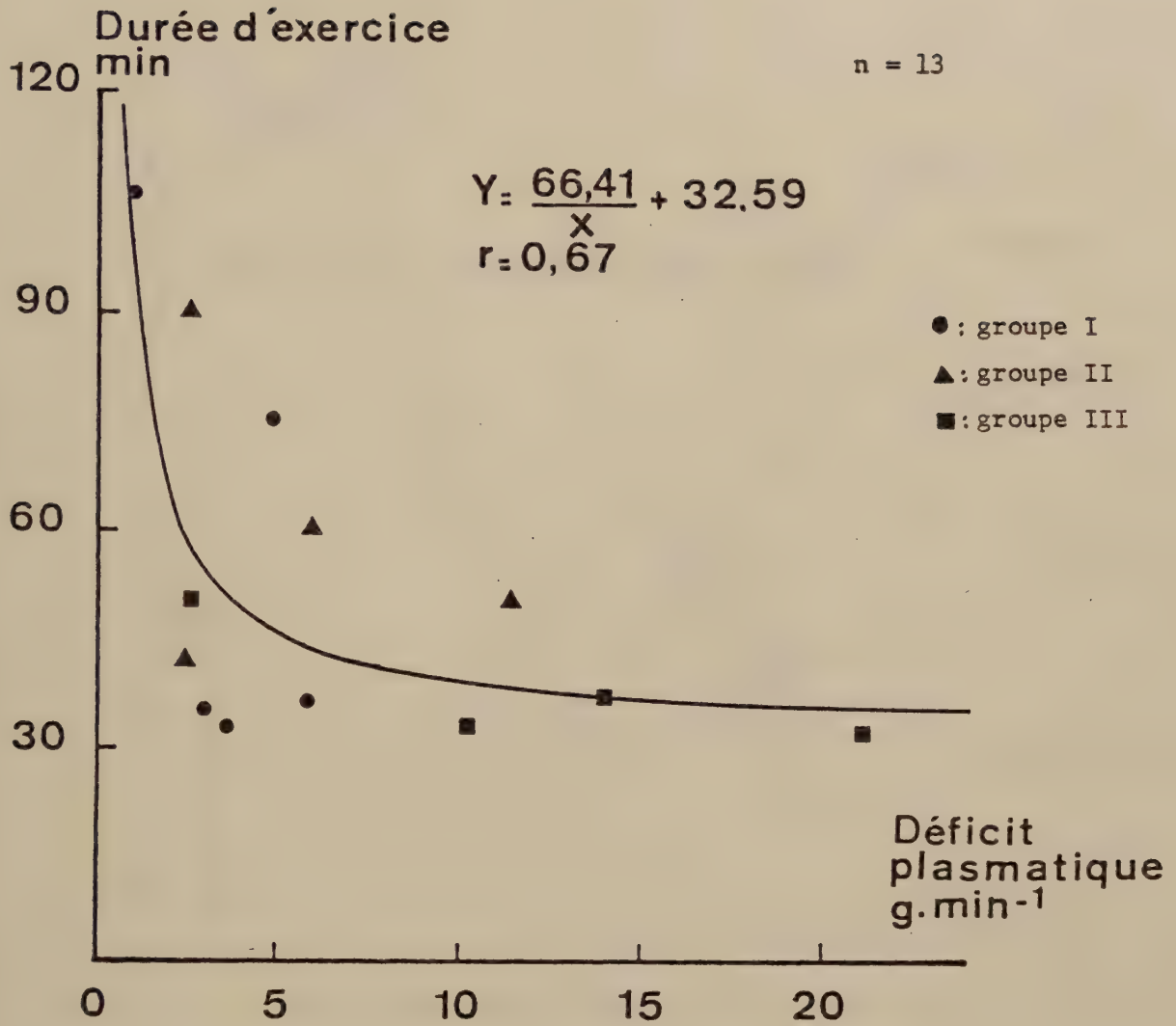


figure n° 16

Corrélation entre la durée d'exercice
et le déficit plasmatique par minute

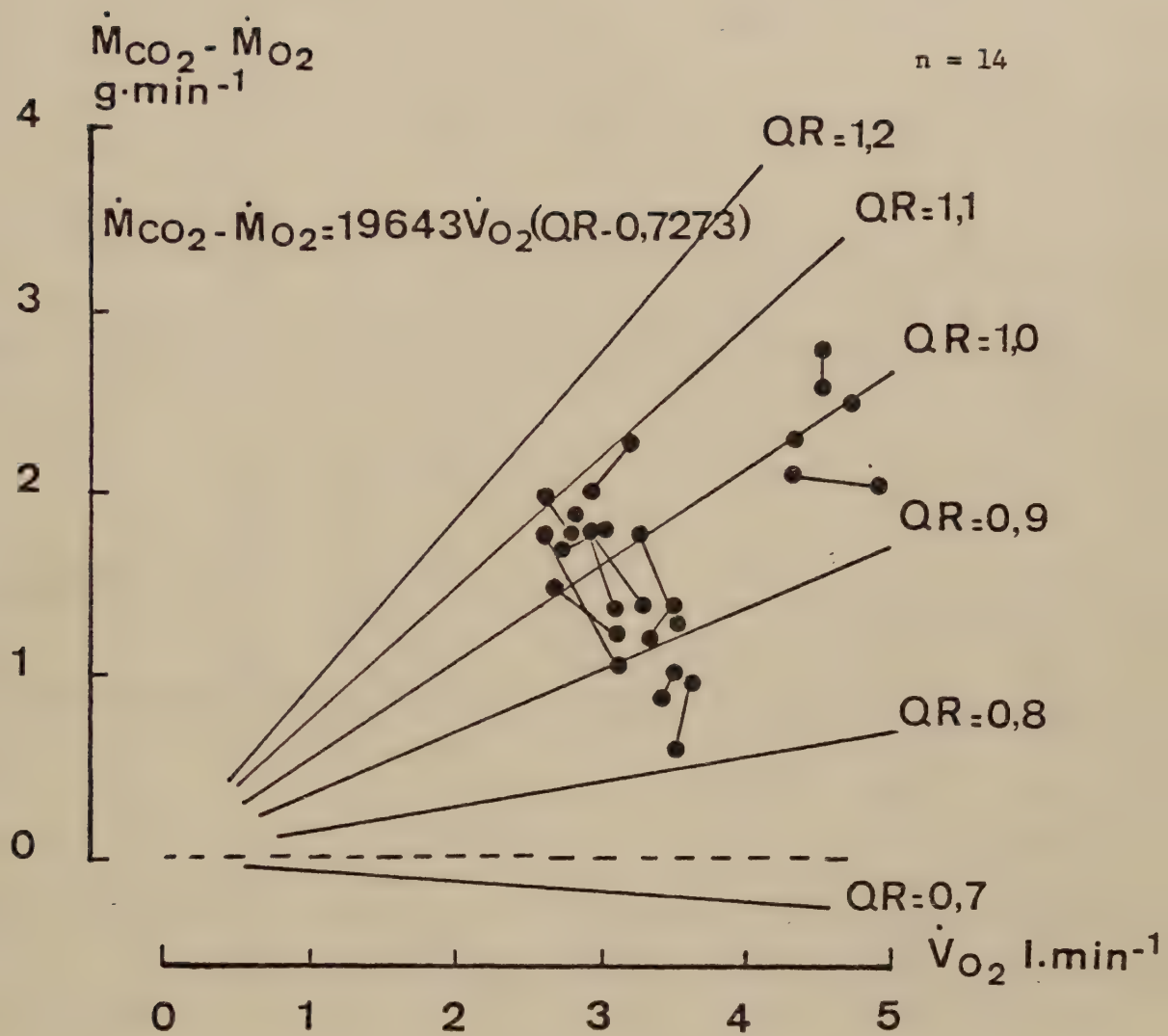


figure n° 17

Evolution des pertes métaboliques respiratoires ($\dot{M}_{CO_2} - \dot{M}_{O_2}$)
 en fonction de l'évolution de $\dot{V}_{O_2}$ pour les 14 sujets

TABLEAU N° 18

sujets	perte de poids g	perte de poids/min g/min	VP ₁	VP ₂	ΔVP	% ΔVP	$\frac{\Delta VP}{\Delta t}$ ml/min
COU	1719	16,2	2,75	2,64	0,11	3,9	1,0
CEL	728	20,2	2,79	2,58	0,21	7,7	5,8
DUM	546	15,6	2,75	2,64	0,11	3,9	3,1
SAV	470	14,2	2,97	2,85	0,12	4,0	3,6
MEL	1200	16,0					
moyenne		16,4 ± 2,2	2,81 ± 0,12	2,68 ± 0,12	0,14 ± 0,05	4,9 ± 2,2	3,4 ± 2,0
MEF	683	13,6	3,24	2,66	0,58	18,2	11,6
WEL	1117	12,4	3,02	2,81	0,21	7,7	2,3
LAS	770	12,8	3,83	3,41	0,42	11,3	7,0
MAR	753	18,1					
DUT	540	12,8	2,75	2,64	0,11	3,9	2,6
moyenne		13,9 ± 2,4	3,21 ± 0,52	2,88 ± 0,42	0,33 ± 0,21	10,3 ± 7	5,9 ± 4,4
DEL	316	9,8	3,28	2,58	0,69	21,4	21,5
TUR	406	12,3	3,06	2,71	0,34	11,4	10,3
DRA	403	10,9	3,60	3,06	0,54	14,9	14,6
JOA	678	13,5	3,38	3,24	0,14	4,0	2,8
moyenne		11,6 ± 1,6	3,33 ± 0,26	2,90* ± 0,34	0,43 ± 0,24	12,9 ± 8,4	12,3 ± 7,8

PERTE DE POIDS ET DEFICIT PLASMATIQUE

d) les pertes en eau

Les valeurs moyennes des différentes pertes en eau exprimées en g/min sont représentées dans le tableau n°19 pour les 3 groupes de sujets.

- pertes d'eau par voie respiratoire

Il n'y a pas de différence significative entre les 3 groupes, le groupe I perd $2,97 \pm 0,74$ g d'eau par minute, le groupe II : $2,21 \pm 0,31$ g/min et le groupe III : $2,52 \pm 0,30$ g/min.

- pertes d'eau par voie cutanée

Les pertes sudorales sont plus importantes pour les sujets du groupe I ($11,66 \pm 2,73$ g/min) que pour les sujets des groupes II ($10,48 \pm 2,08$ g/min) et III

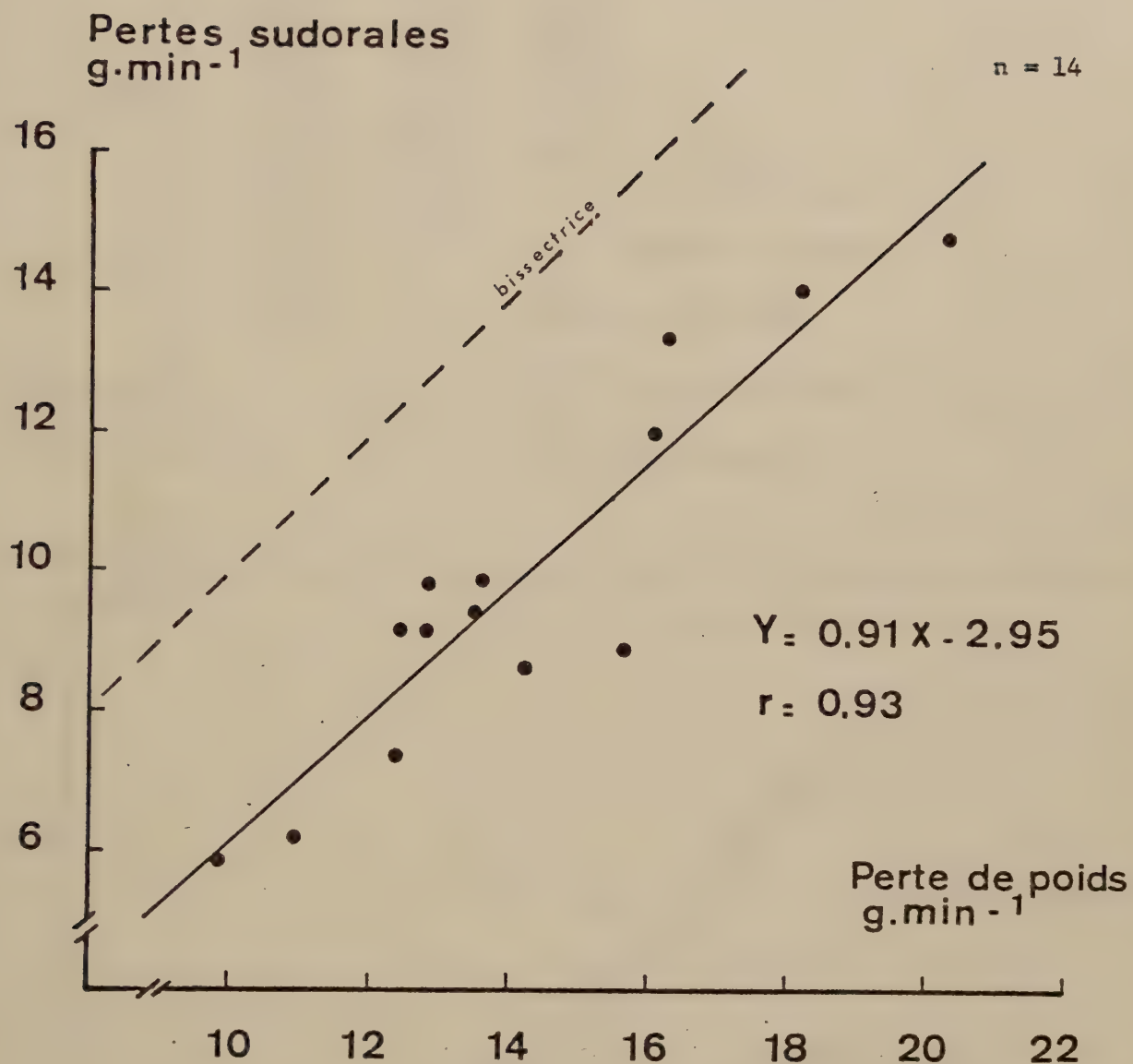
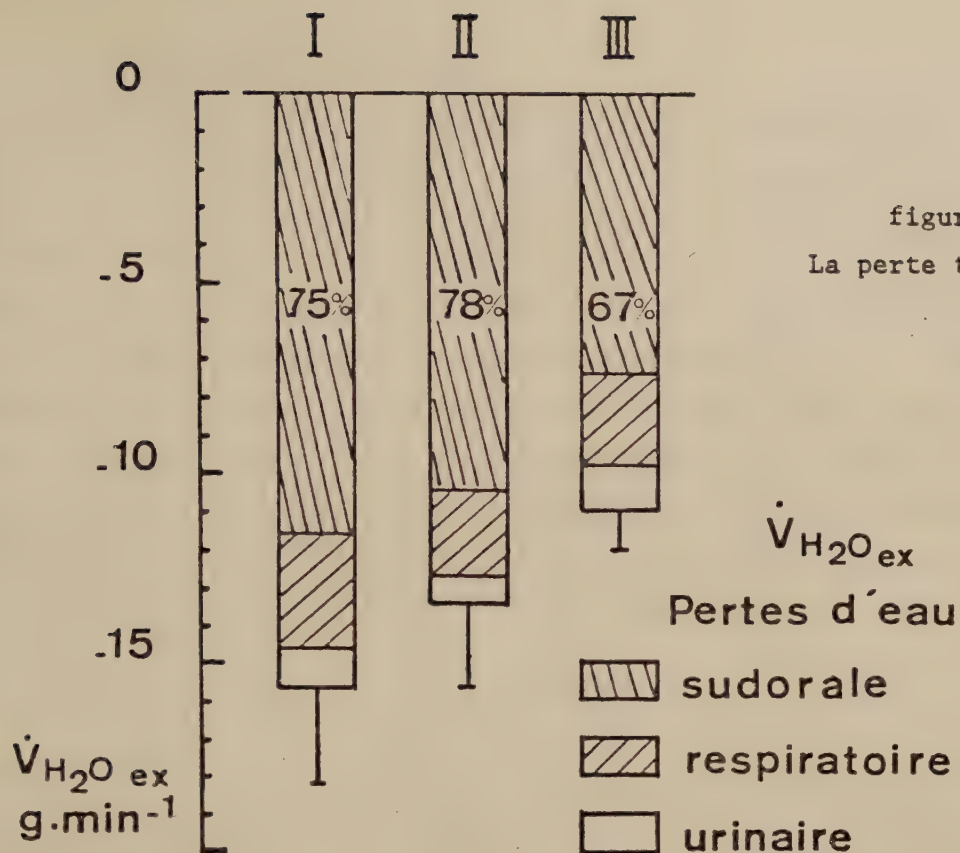


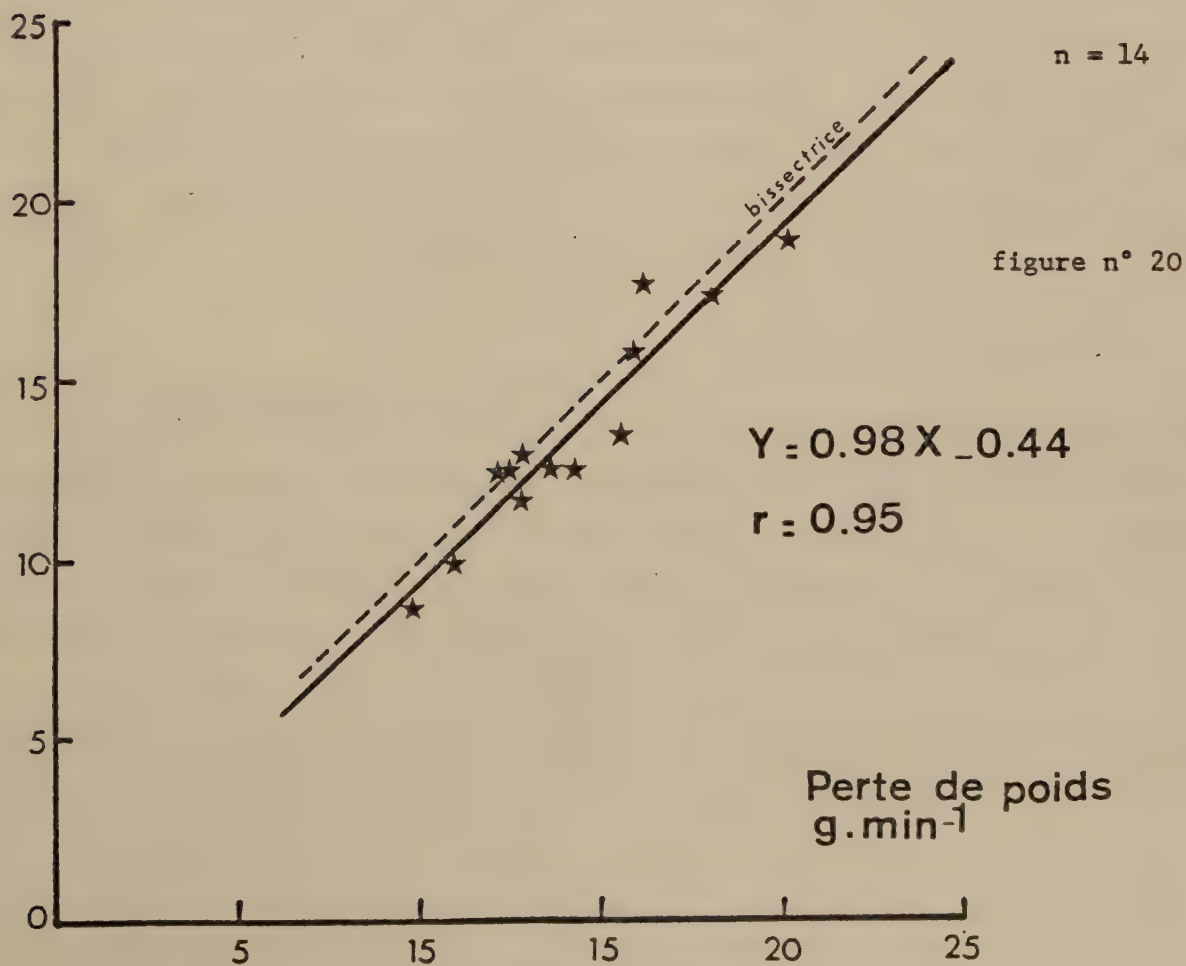
figure n° 18

Corrélation entre les pertes sudorales (g/min)
et la perte de poids (g/min)



Pertes d'eau
g.min⁻¹

Corrélation entre la perte totale en eau (g/min)
et la perte de poids (g/min)



e) la production d'eau

Pour chaque groupe, les valeurs moyennes de la production d'eau résultant des transformations internes (eau liée, glycolyse, lipolyse et protéolyse) au cours de l'exercice musculaire sont représentées dans le tableau n°20.

Cette production d'eau, comme le montre la figure n°21, est plus importante pour le groupe I ($15,25 \pm 5,73$ g/min) que pour les groupes II ($10,94 \pm 1,90$ g/min) et III ($12,53 \pm 0,99$ g/min), mais les différences entre les 3 groupes ne sont pas significatives. Cette figure montre également que l'eau liée au glycogène est la source la plus importante de la production hydrique : environ 80 % pour les 3 groupes. L'eau produite par glycolyse représente 17 % pour les groupes I et II et 18 % pour le groupe III. L'eau produite par lipolyse représente 2,5 % pour le groupe I, 3,7 % pour le groupe II et 0 % pour le groupe III.

TABLEAU N° 20

GROUPES	GLUCIDES		LIPIDES	PROTIDES	PRODUCTION D'EAU g/min
	eau liée g/min	glycolyse g/min	lipolyse g/min	protéolyse g/min	
I	$12,14 \pm 7,00$	$2,68 \pm 1,12$	$0,39 \pm 0,53$	$0,03 \pm 0,01$	$15,25 \pm 5,73$
II	$8,60 \pm 1,92$	$1,90 \pm 0,42$	$0,41 \pm 0,46$	$0,01 \pm 0,00$	$10,94 \pm 1,90$
III	$10,23 \pm 0,80$	$2,26 \pm 0,18$	$0,01 \pm 0,02$	$0,02 \pm 0,01$	$12,53 \pm 0,99$

TRANSFORMATIONS INTERNES

f) le déficit hydrique (tableau n°21)

Il représente le bilan entre les pertes et les productions hydriques au cours de l'exercice musculaire. Ce bilan est représenté dans la figure n°21 qui montre l'existence d'un déficit hydrique plus élevé pour le groupe II ($2,59 \pm 2,91$ g/min) que pour le groupe I ($0,34 \pm 7,61$ g/min). Quant au groupe III, la production est supérieure à la déperdition hydrique puisque le déficit est négatif ($-1,63 \pm 1,06$ g/min). La différence entre les groupes II et III est significative pour $P < 0,05$.

La mauvaise corrélation ($r = 0,36$) entre le déficit hydrique et la perte de poids par minute indique que celle-ci est un mauvais reflet de ce déficit (figure n°22).

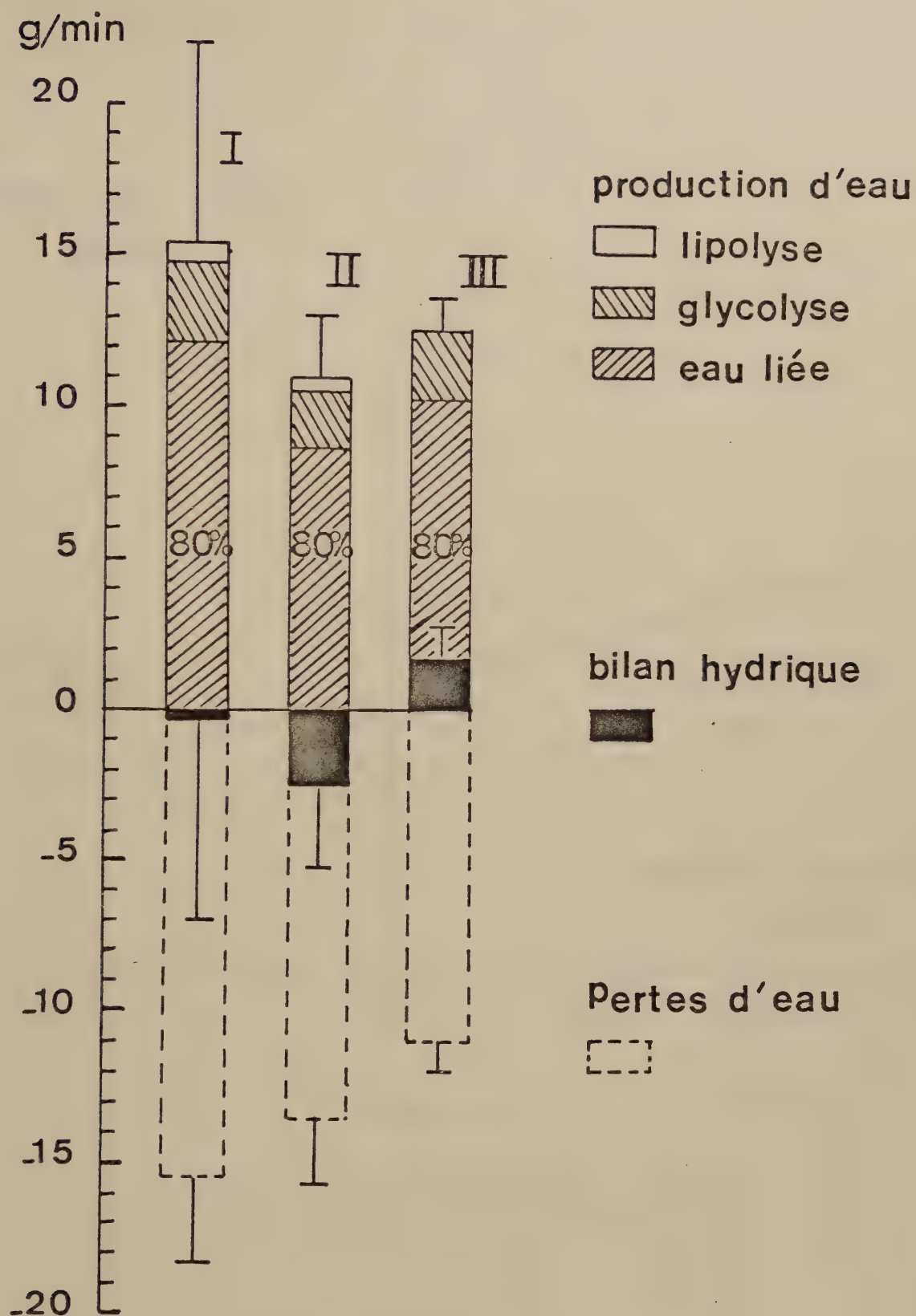


figure n° 21

La production d'eau et le bilan hydrique
pour les 3 groupes de sujets

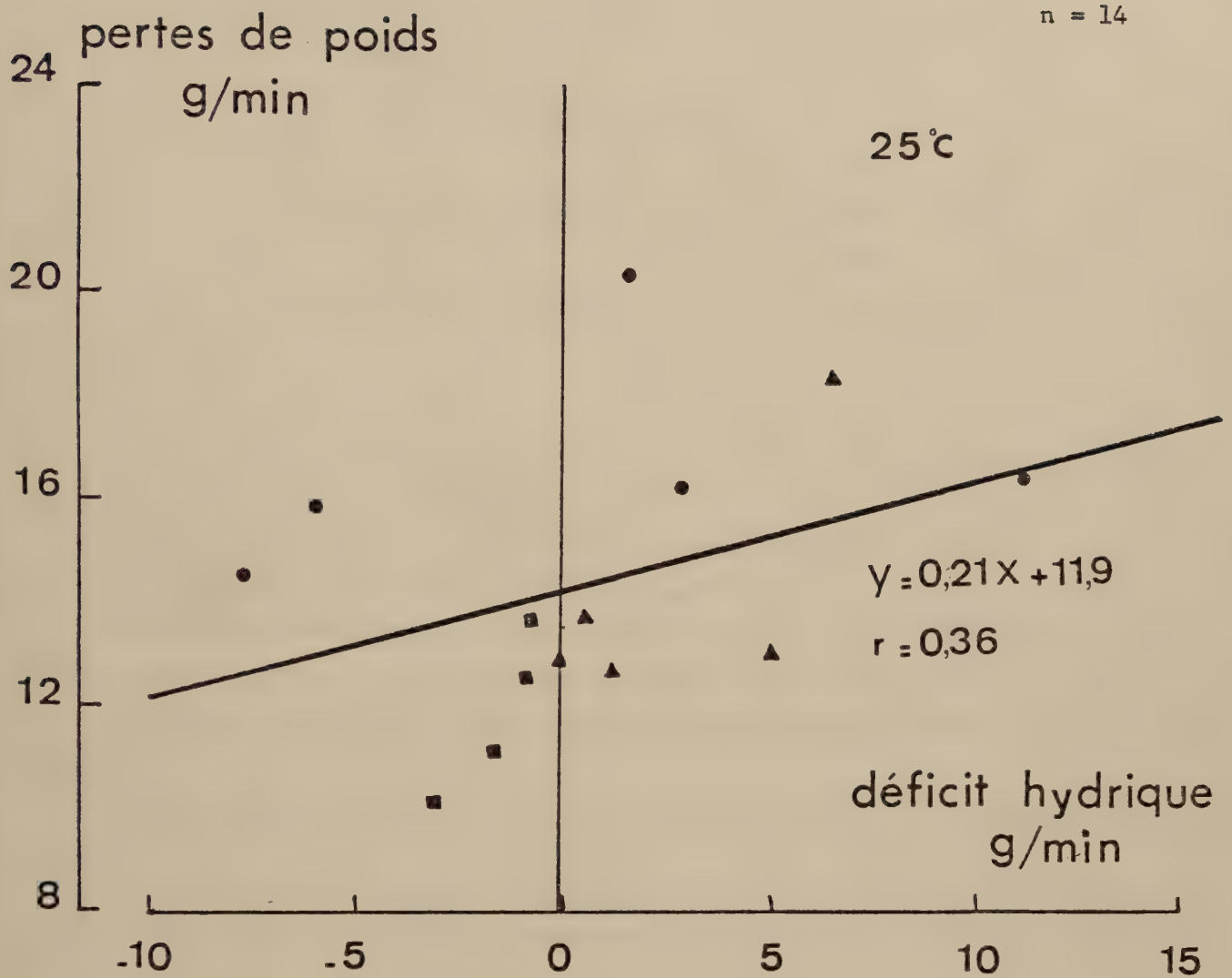


figure n° 22

Corrélation entre la perte de poids (g/min)
et le déficit hydrique (g/min) pour les 14 sujets

- : groupe I
- ▲ : groupe II
- : groupe III

TABLEAU N° 21

groupes	déficit hydrique (g/min)
I	+ 0,34 $\pm$ 7,61
II	+ 2,59 $\pm$ 2,91
III	- 1,63 $\pm$ 1,06

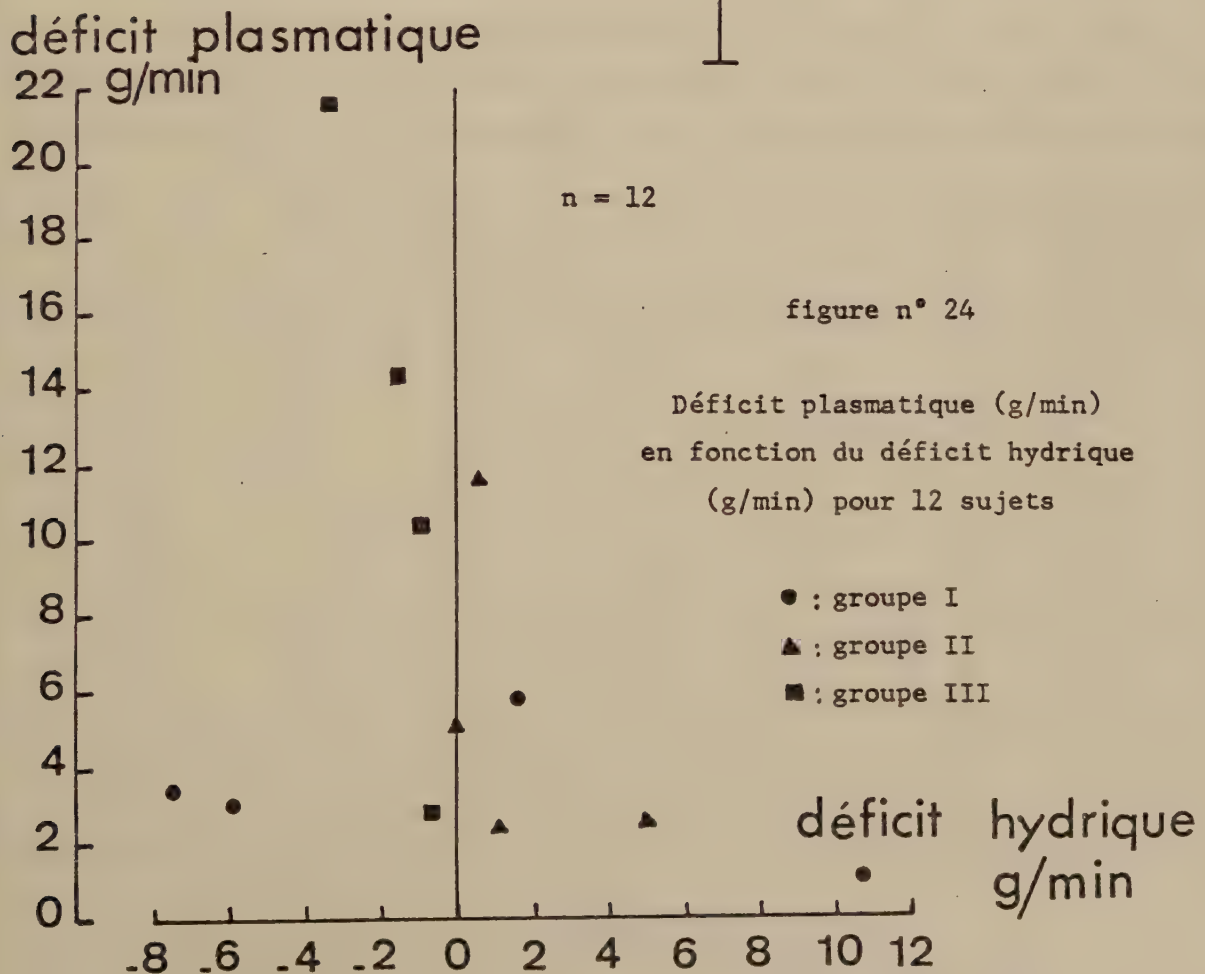
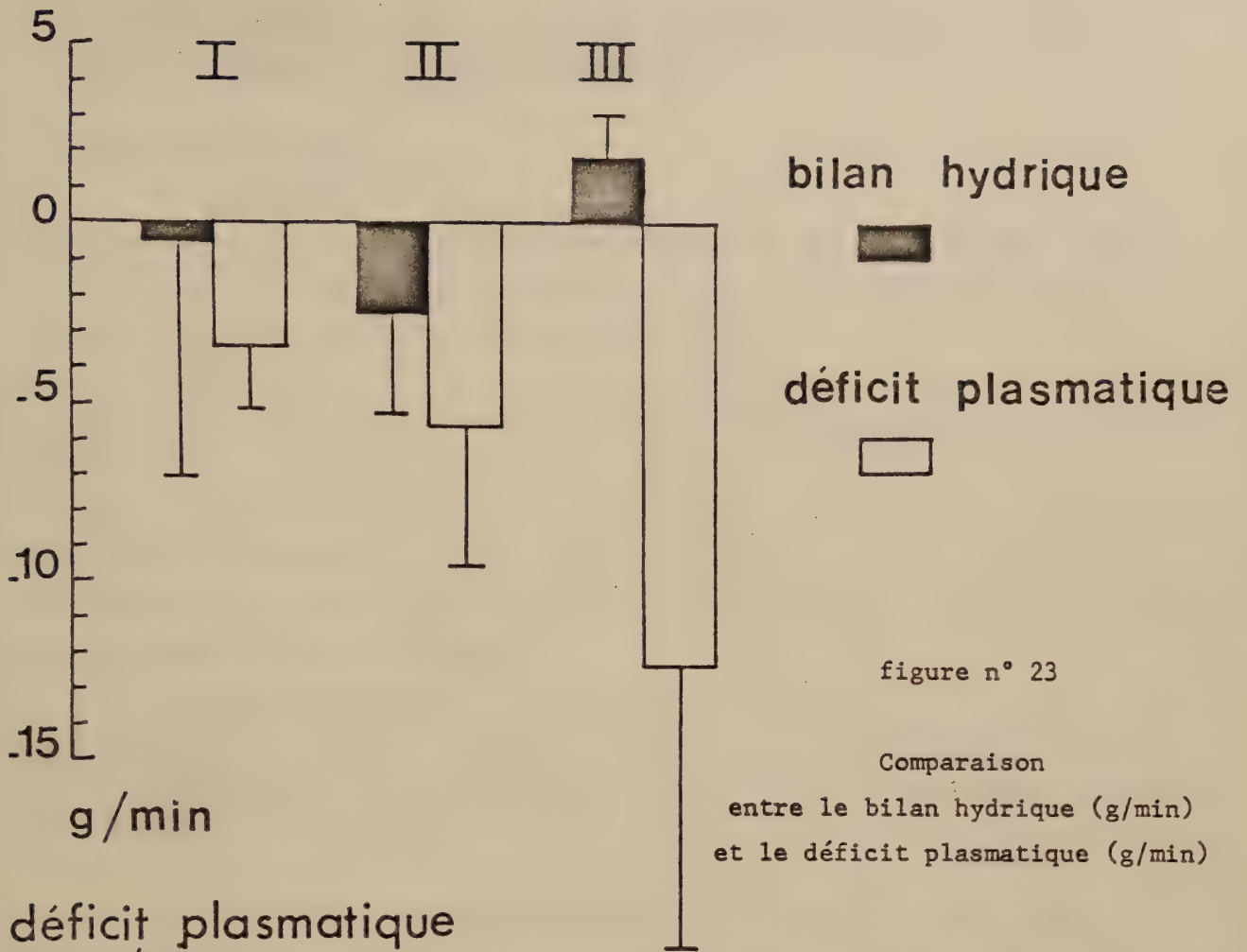
En comparant le déficit hydrique avec l'estimation du déficit plasmatique (figure n°23), on note que celui-ci est :

- légèrement supérieur au déficit hydrique pour les groupes I et II
- très supérieur au bilan hydrique du groupe III

La différence entre déficit plasmatique et hydrique représente une rétention d'eau dans le secteur extravasculaire (interstitiel et/ou intracellulaire).

Il existe cependant une forte variabilité individuelle comme le montre la figure n°24 :

- les sujets endurants ont une faible variabilité du déficit plasmatique alors que leur déficit hydrique est très variable.
- les sujets peu endurants ont une importante variabilité du déficit plasmatique pour une variabilité du déficit hydrique plus faible (les 4 sujets du groupe III produisant plus d'eau qu'ils n'en perdent).



II - ETUDE COMPARATIVE PORTANT SUR 8 SUJETS EFFECTUANT UN EXERCICE MUSCULAIRE SOUS DEUX AMBIANCES THERMIQUES DIFFERENTES.

1 - L'exercice musculaire

a) son intensité

Les moyennes des puissances relatives de l'exercice sont sensiblement identiques à 25°C ($78,9 \pm 7,6$ % du $\dot{V}O_2$ max) et à 35°C ($76,6 \pm 9$ % du $\dot{V}O_2$ max), malgré quelques variations individuelles entre 25°C et 35°C.

b) sa durée

La moyenne des durées d'exercice est plus importante à 25°C ($53,4 \pm 20,7$ min) qu'à 35°C ($40,4 \pm 14,5$ min).

Sur la figure n°25, le groupe des huit sujets est placé à 25°C et à 35°C en fonction des intensités et des durées d'exercice. A 35°C, le groupe des 8 sujets, situé par rapport aux courbes d'endurance d'ASTRAND et RODAHL, se rapproche de la courbe "endurance faible".

c) l'acide lactique

Malgré quelques variations individuelles entre 25°C et 35°C, les moyennes des lactatémies après exercice sont assez semblables à 25°C ($41,3 \pm 11$ mg/100 ml) et à 35°C ($42,1 \pm 18$ mg/100 ml).

Les valeurs individuelles concernant l'intensité, la durée et la lactatémie après exercice à 35°C sont représentées dans le tableau n°22. Les valeurs individuelles à 25°C sont représentées dans le tableau n°3 au chapitre III p.25

sujets	% de $\dot{V}O_2$ max	durée en min	lactatémie après exercice mg/100 ml
MEL	72	51	17,5
MEF	83	36	34
WEL	66	66	47
LAS	74	46	28
DEL	70	27	39,4
TUR	95	25	70,9
DRA	77	26	58
JOA	77	46	
moyenne	$76,6 \pm 9$	$40,4 \pm 14$	$42,1 \pm 18$

TABLEAU N°22

INTENSITE ET DUREE DE L'EXERCICE MUSCULAIRE A 35°C.

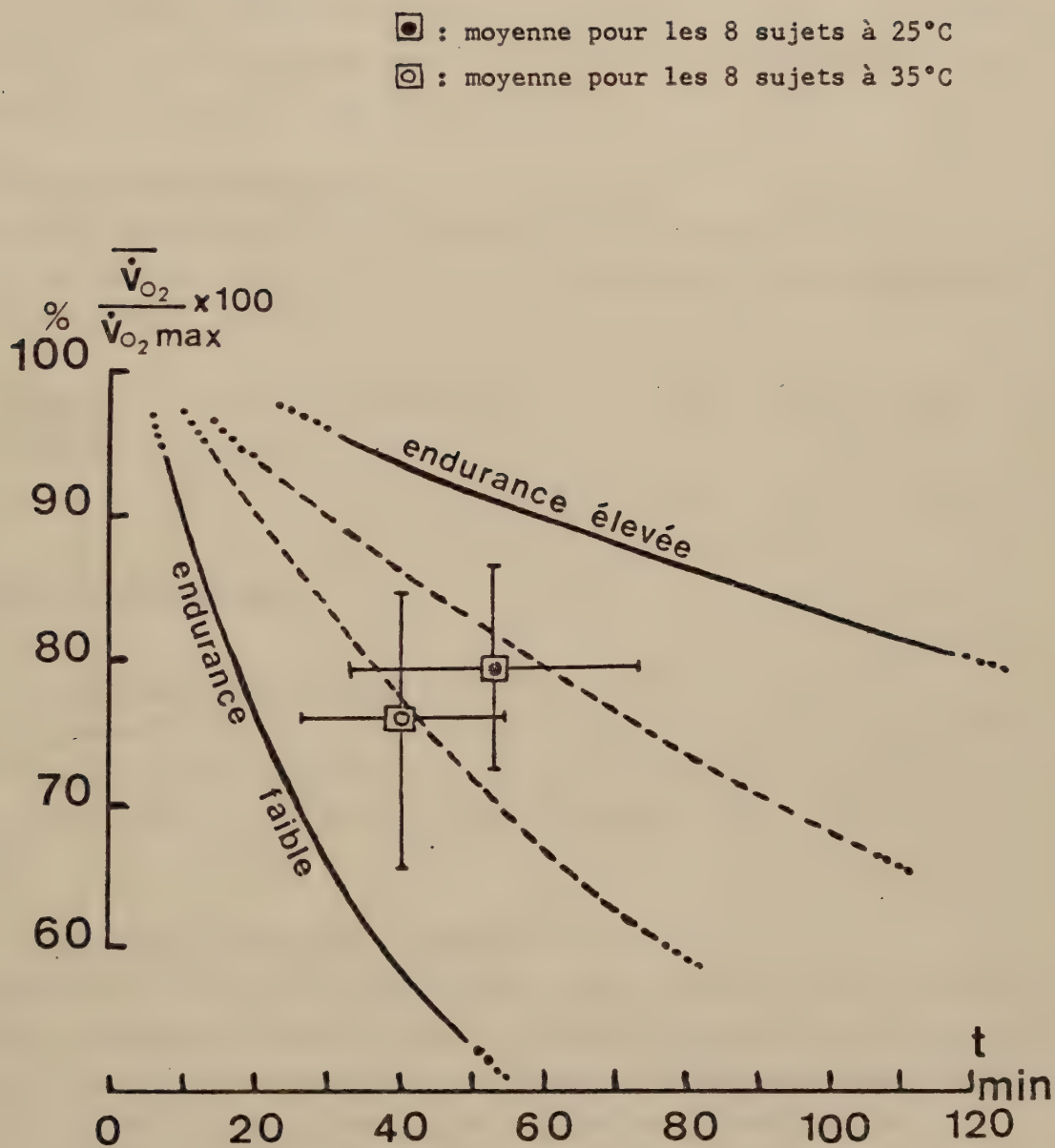


figure n° 25

Intensité de l'exercice en fonction de sa durée
pour 8 sujets ayant travaillé à 25°C et à 35°C

2 - La ventilation

a) le débit ventilatoire

Comme à 25°C, on observe à 35°C une augmentation du débit ventilatoire entre la 5^{ème} minute ($81,4 \pm 9,9$ l/min) et la fin de l'exercice ($95,46 \pm 19,2$ l/min). Cette augmentation à 35°C ($\Delta \dot{V}_E = 14,01 \pm 13,4$ l/min) est inférieure à celle qui existe à 25°C ($\Delta \dot{V}_E = 21,32 \pm 9$ l/min), mais la différence n'est pas significative.

b) le volume courant

Comme à 25°C, le volume courant à 35°C subit une diminution entre la 5^{ème} minute ($2,54 \pm 0,45$ l) et la fin de l'exercice ($2,23 \pm 0,43$ l) ; cette diminution est peu différente à 25°C et à 35°C ($\Delta V_T \approx 0,30$ l).

c) la fréquence respiratoire

L'évolution de la fréquence respiratoire entre la 5^{ème} minute ($f = 33 \pm 7$ cycles/min) et la fin de l'exercice ($f = 44 \pm 9$ cycles/min) est peu différente de celle existant à 25°C.

Les valeurs moyennes concernant $\dot{V}_E$, V_T et f à 25°C et à 35°C sont représentées dans le tableau n°23.

3 - Le métabolisme énergétique

a) la consommation d'oxygène (voir tableau n°24)

Comme à 25°C, il existe à 35°C une augmentation (mais non significative) de $\dot{V}O_2$ entre la 5^{ème} minute ($2,78 \pm 0,3$ l/min) et la fin de l'exercice ($2,99 \pm 0,31$ l/min). $\dot{V}O_2$ à 35°C ($2,88 \pm 0,28$ l/min) est peu différent de $\dot{V}O_2$ à 25°C ($2,94 \pm 0,21$ l/min).

b) le quotient respiratoire (tableau n°24)

Le QR à 5 minutes est plus élevé à 25°C ($1,06 \pm 0,03$) qu'à 35°C ($1,01 \pm 0,04$) ; il diminue avec la durée de l'exercice pour atteindre une valeur finale peu différente à 25°C ($0,98 \pm 0,07$) et à 35°C ($0,98 \pm 0,13$) ; QR est plus élevé à 25°C ($1,02 \pm 0,05$) qu'à 35°C ($0,99 \pm 0,06$), mais de façon non significative.

Si on étudie le pourcentage de l'énergie fournie par les différents substrats en fonction de l'ambiance thermique, on note qu'à 25°C, 95 % environ de l'énergie est fournie par les glucides et 3,6 % seulement par les lipides, alors qu'à 35°C, 87,4 % de l'énergie est fournie par les glucides et 11 % par les lipides.

TABLEAU N°23

ambiance thermique	25°C	35°C
$\dot{V}_E$ 5 min (1/min) BTPS	82,9 ± 13,0	81,4 ± 9,9
$\dot{V}_E$ fin (1/min) BTPS	104,2 ± 14,3	95,5 ± 19,2
$\Delta \dot{V}_E$ (1/min) BTPS	21,3 ± 9,0	14,0 ± 13,4
V_T 5 min (1 BTPS)	2,68 ± 0,30	2,54 ± 0,45
V_T fin (1 BTPS)	2,26 ± 0,28	2,23 ± 0,43
V_T (1 BTPS)	0,32 ± 0,40	0,31 ± 0,30
f (5 min) (cycles/min)	31 ± 6	33 ± 7
f (fin) (cycles/min)	44 ± 6	44 ± 9
$\dot{V}O_2$ 5 min (1/min)	2,76 ± 0,19	2,78 ± 0,30
$\dot{V}O_2$ fin (1/min)	3,11 ± 0,25	2,99 ± 0,30
$\overline{\dot{V}O_2}$ (1/min)	2,94 ± 0,21	2,88 ± 0,28

PARAMETRES RESPIRATOIRES

TABLEAU N°24

ambiance thermique	QR 5 min	QR fin	— QR	pourcentage d'énergie fournie par les différents substrats		
				GLUCIDES	LIPIDES	PROTIDES
25°C	1,06 ± 0,03	0,98 ± 0,07	1,02 ± 0,05	95,06 ± 4,72	3,66 ± 4,94	1,28 ± 0,42
35°C	1,01 ± 0,04	0,98 ± 0,13	0,99 ± 0,06	87,41 ± 13	11,09 ± 12,8	1,50 ± 0,48

QUOTIENTS RESPIRATOIRES à 25°C et à 35°C

4) La fréquence cardiaque

Au repos et après 2 minutes d'exercice, les moyennes de F sont légèrement plus basses à 25°C qu'à 35°C (voir tableau n°25). Mais par la suite, les moyennes de F sont peu différentes entre 25°C et 35°C jusqu'à la 25^{ème} minute. Après la 25^{ème} minute, les moyennes sont faussées du fait de l'arrêt de l'exercice par certains sujets.

TABLEAU N°25

temps ambiance thermique	0	2	5	10	15	20	25
25°C	78 ± 13	145 ± 16	162 ± 8	169 ± 6	171 ± 6,5	175 ± 5	179 ± 6,5
35°C	81 ± 13	150 ± 8	162 ± 7	168 ± 6	171 ± 5	175 ± 5	179 ± 5,5

EVOLUTION DE F JUSQU'A LA 25^{ème} MINUTE
à 25°C et à 35°C

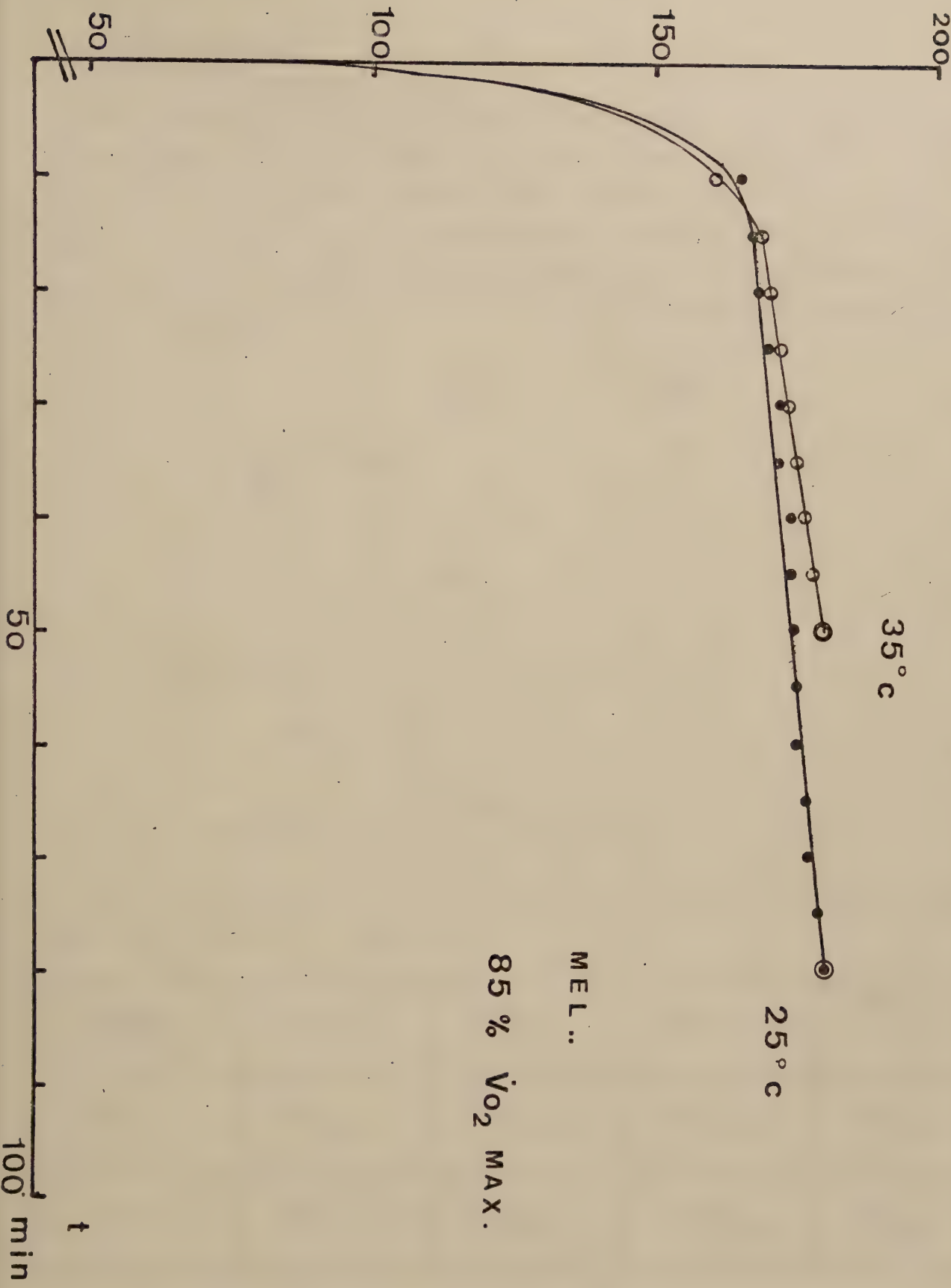
La figure n°26 représente l'évolution temporelle de F aux 2 températures ambiantes pour le sujet (MEL). A 25°C et à 35°C, les fréquences cardiaques sont peu différentes jusqu'à la 40^{ème} minute, puis l'élévation de F est plus marquée à 35°C qu'à 25°C où l'évolution reste toujours très progressive vers F max.

A 35°C, deux sujets (DEL) et (MEL) atteignent leur F max ; par contre les autres sujets, comme le montre le tableau n°26 terminent l'exercice avec une F inférieure à celle qu'ils avaient à 25°C. En moyenne F en fin d'exercice est à 95,8 ± 3,1 % de F max, alors qu'elle est à 97,4 ± 2,8 % de F max à 25°C.

TABLEAU N° 26
FREQUENCES CARDIAQUES EN FIN D'EXERCICE à 35°C

sujets	F max bat/min	F fin d'exercice bat/min	% $\frac{F \text{ (fin)}}{F \text{ max}}$
MEL	180	180	100
MEF	199	187	94
WEL	214	207	96,7
LAS	207	190	91,8
DEL	187	187	100
TUR	192	182	94,8
DRA	189	175	92,6
JOA	196	190	97
moyenne		187,2 ± 9,5	95,8 ± 3,1

figure n° 26 : Evolution temporelle de F à 25°C et à 35°C pour un sujet



5 - Le bilan thermique

a) la température rectale

Il existe également à 35°C une augmentation très significative ($P < 0,01$) de T_{re} entre le début et la fin de l'exercice. Cette augmentation ($\Delta T_{re} = 1,40 \pm 0,36^\circ\text{C}$) est peu différente de celle observée à 25°C ($\Delta T_{re} = 1,46 \pm 0,31^\circ\text{C}$), bien que la durée de l'exercice ne soit en moyenne que de 40 minutes à 35°C pour 53 minutes à 25°C. Il en résulte, comme le montre la figure n°27, que l'augmentation de T_{re} par unité de temps est supérieure à 35°C ($0,038 \pm 0,016^\circ\text{C/min}$) par rapport à 25°C ($0,029 \pm 0,009^\circ\text{C/min}$).

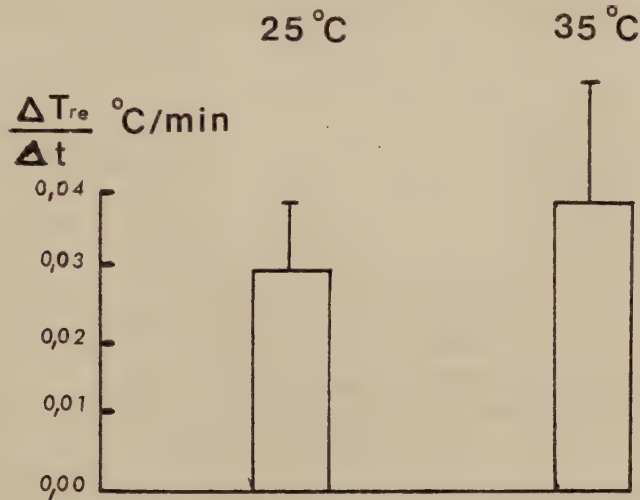


figure n° 27

Augmentation absolue de T_{re} par minute à 25°C et à 35°C

Les valeurs moyennes de T_{re} au début et en fin d'exercice à 25°C et à 35°C sont représentées dans le tableau n°27.

ambiance thermique	T_{re_1} °C	T_{re_2} °C	ΔT_{re} °C	$\frac{\Delta T_{re}}{\Delta t}$ °C/min
25°C	37,48 $\pm 0,16$	38,93 $\pm 0,40$	1,46 $\pm 0,31$	0,029 $\pm 0,009$
35°C	37,40 $\pm 0,24$	38,80 $\pm 0,30$	1,40 $\pm 0,36$	0,038 $\pm 0,016$

TABLEAU N°27

EVOLUTION DE T_{re} à 25°C et à 35°C

b) la température cutanée

La figure n°28 représente les évolutions temporelles de Tsk pour les 8 sujets à 35°C. On note, comme à 25°C, une diminution de Tsk durant les 5 premières minutes de l'exercice (Tsk passe de $34,6 \pm 0,7^{\circ}\text{C}$ au repos à $33,74 \pm 0,52^{\circ}\text{C}$ à 5 min) qui correspond à une diminution moyenne de $0,86^{\circ}\text{C}$ à 35°C pour une diminution moyenne de $0,79^{\circ}\text{C}$ à 25°C. Après la 5^{ème} minute, on note généralement une augmentation très progressive et peu importante de Tsk. Pour la plupart des sujets, Tsk (fin) est légèrement inférieure à Tsk (repos), que ce soit à 25°C ou à 35°C. Ces valeurs sont représentées dans le tableau n°28, où on note que $\overline{\text{Tsk}}$ à 35°C ($34,06 \pm 0,6^{\circ}\text{C}$) est significativement plus élevée ($P<0,01$) qu'à 25°C ($31,45 \pm 0,54^{\circ}\text{C}$).

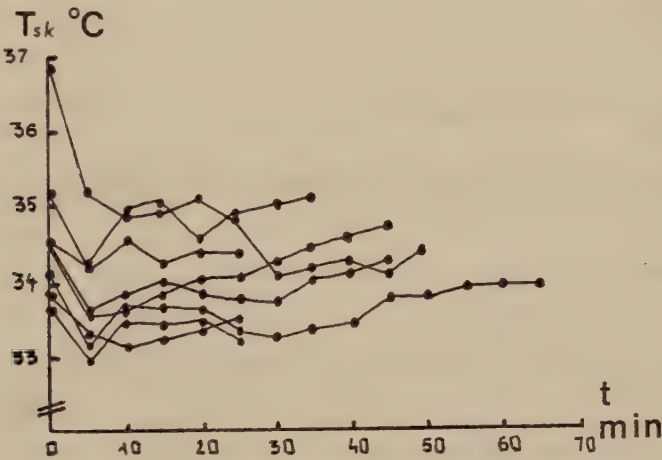


figure n° 28

Evolution temporelle de Tsk pour les 8 sujets à 35°C

ambiance thermique	Tsk (repos) °C	Tsk (5 min) °C	Tsk (fin) °C	$\overline{\text{Tsk}}$ °C
25°C	31,74 $\pm 0,50$	30,95 $\pm 0,60$	31,70 $\pm 0,65$	31,45 $\pm 0,54$
35°C	34,60 $\pm 0,70$	33,74 $\pm 0,52$	34,19 $\pm 0,63$	34,06 $\pm 0,60$

TABEAU N° 28
EVOLUTION DE Tsk à 25°C et à 35°C

6 - Le bilan biologique sanguin et urinairea) le ionogramme sanguin

A 35°C, on retrouve les mêmes variations obtenues à 25°C dans le chapitre I. Il n'y a donc pas de différence significative pour les valeurs du ionogramme sanguin entre 35°C et 25°C.

Dans le tableau n°29 sont seulement représentées les valeurs des composantes du ionogramme qui subissent une variation significative après l'exercice .

(* pour $0,01 < P < 0,05$ et ** pour $P < 0,01$)

TABLEAU N° 29
IONOGRAMMES SANGUINS à 25°C et à 35°C

ambiance thermique		25°C	35°C
Hématocrite ₁	%	45,43 $\pm$ 1,2	45,71 $\pm$ 1,5
Hématocrite ₂	%	48,85 $\pm$ 1,6 *	48,73 $\pm$ 1,6 *
[Protéines] ₁	g/l	72,37 $\pm$ 2	72,72 $\pm$ 3
[Protéines] ₂	g/l	79,22 $\pm$ 1,8 **	80,21 $\pm$ 2,4 **
[HCO ₃ ⁻] ₁	mEq/l	28,06 $\pm$ 2,6	27,63 $\pm$ 1,3
[HCO ₃ ⁻] ₂	mEq/l	19,75 $\pm$ 3,4 **	19,51 $\pm$ 2 **
[ions phosphores] ₁	mg/l	34,56 $\pm$ 2,5	21,07 $\pm$ 2,2
[ions phosphores] ₂	mg/l	49,06 $\pm$ 4 **	21,24 $\pm$ 2,7 **
[Ca ⁺⁺] ₁	mg/l	94,37 $\pm$ 3,4	93,62 $\pm$ 2,4
[Ca ⁺⁺] ₂	mg/l	100,37 $\pm$ 3,8 *	98,62 $\pm$ 2,8 *
[créatinine] ₁	mg/l	12 $\pm$ 1,4	12,25 $\pm$ 1
[créatinine] ₂	mg/l	14,7 $\pm$ 1,6 *	14,94 $\pm$ 1 *

b) le ionogramme urinaire (tableau n° 30)

Comme à 25°C, on ne note pas de variation significative à 35°C après l'exercice pour [Na⁺], [K⁺], [Cl⁻], l'urée et l'osmolalité urinaire. Il existe également une diminution, mais non significative du rapport $\frac{[Na^+]}{[K^+]}$ après l'exercice qui passe de 1,9 à 1,4 à 35°C.

TABLEAU N° 30

ambiance thermique	25°C	35°C
$[Na^+]_1$ mEq/l	101 ± 46	$156,1 \pm 26$
$[Na^+]_2$ mEq/l	$104,3 \pm 40$	$128,5 \pm 36$
$[K^+]_1$ mEq/l	$37,4 \pm 20$	$82 \pm 22,8$
$[K^+]_2$ mEq/l	$54,8 \pm 18$	$94,6 \pm 32$
$\frac{[Na^+]}{[K^+]}_1$	2,7	1,9
$\frac{[Na^+]}{[K^+]}_2$	1,9	1,4
$[Cl^-]_1$ mEq/l	$100,8 \pm 56$	$169,5 \pm 14$
$[Cl^-]_2$ mEq/l	$117,7 \pm 48$	141 ± 40
$[urée]_1$ g/l	$13,5 \pm 8$	22 ± 4
$[urée]_2$ g/l	$16,4 \pm 7$	22 ± 5
osmolalité urinaire 1 mOsm/kg	$663,2 \pm 274$	928 ± 202
osmolalité urinaire 2 mOsm/kg	$629,7 \pm 312$	966 ± 194

IONOGRAMMES URINAIRES à 25°C et à 35°C.

c) les hormones (voir tableau n°32)- les hormones plasmatiques

A 35°C, on retrouve les augmentations des taux hormonaux plasmatiques observées à 25°C dans le chapitre I :

. on note une augmentation plus importante à 35°C de [neurophysine] après l'exercice : le coefficient de multiplication du taux de base est de 2,1 à 25°C et de 4,8 à 35°C.

. par contre, l'augmentation de [aldostérone] après l'exercice est moins importante à 35°C (x 6,8) qu'à 25°C (x 11).

. en ce qui concerne $[ADH]_p$ à 35°C, seuls 3 résultats sur les 8 sont interprétables, nous n'avons donc pas représenté ces valeurs dans le tableau n° , celles-ci semblent cependant indiquer une augmentation plus importante de $[ADH]_p$ après l'exercice à 35°C qu'à 25°C où le coefficient de multiplication du taux de base est de 5.

. il n'y a pas de différence très marquée pour l'augmentation de l'ARP après exercice entre 35°C (x 3,4) et 25°C (x 4,3).

Dans le tableau n°31 sont représentées les augmentations des taux hormonaux plasmatiques par unité de temps. Comme le montre la figure n° 29, cette augmentation par minute de [neurophysine], [aldostérone] et de l'ARP est moins importante à 25°C qu'à 35°C. Cette différence est surtout importante pour la neurophysine où l'augmentation de [neurophysine] par minute est 2 fois plus importante à 35°C ($0,123 \pm 0,09$ ng/ml/min) qu'à 25°C ($0,05 \pm 0,06$ ng/ml/min). L'ADH n'est pas représentée sur cette figure par manque de résultats interprétables à 35°C.

- l'ADH urinaire

A 35°C comme à 25°C, il n'y a pas de variation significative de $[ADH]_u$ après l'exercice.

TABLEAU N° 31

ambiance thermique	$\frac{\Delta[\text{neurophysine}]}{\Delta t}$ ng/ml/min	$\frac{\Delta \text{ARP}}{\Delta t}$ (ng/l/min)/min	$\frac{\Delta[\text{aldostérone}]}{\Delta t}$ pg/ml/min
25°C	$0,050 \pm 0,06$	$4,68 \pm 2,62$	$11,76 \pm 4,58$
35°C	$0,123 \pm 0,09$	$5,38 \pm 3,28$	$16,89 \pm 5,21$

AUGMENTATION PAR UNITE DE TEMPS DU TAUX DES HORMONES PLASMATIQUES

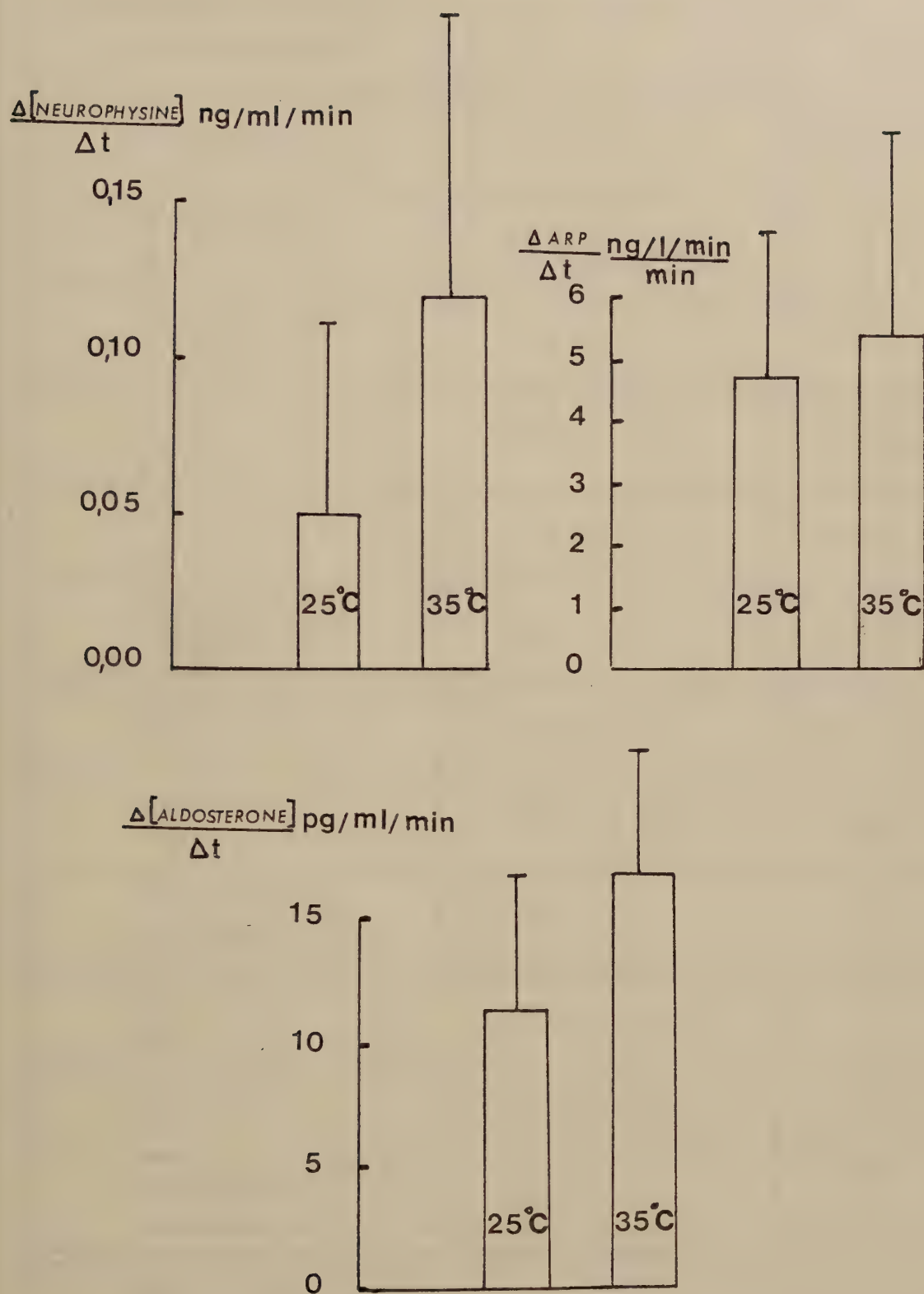


figure n° 29

Elévation des taux hormonaux plasmatiques par minute à 25°C et à 35°C

TABLEAU N° 32

ambiance thermique	25°C	35°C
[neurophysine]1 ng/ml	2,05 $\pm$ 0,7	1,17 $\pm$ 0,5
[neurophysine]2 ng/ml	4,35 $\pm$ 1,3	5,63 $\pm$ 2
coefficient de multiplication	2,1	4,8
ARP 1 ng/l /min	72,3 $\pm$ 22,2	84,67 $\pm$ 33
ARP 2 ng/l /min	312 $\pm$ 124,1	294,62 $\pm$ 70
coefficient de multiplication	4,3	3,4
[aldostérone]1 pg/ml	62,87 $\pm$ 41,2	111 $\pm$ 76,6
[aldostérone]2 pg/ml	693,25 $\pm$ 184	756,75 $\pm$ 166,6
coefficient de multiplication	11	6,8
[ADH]plasm 1 mU/ml	$\leq$ 3,03 $\pm$ 1,2	
[ADH]plasm 2 mU/ml	15,22 $\pm$ 8,4	
coefficient de multiplication	5	
[ADH]urinaire 1 mU/h	2,14 $\pm$ 0,8	2,56 $\pm$ 0,64
[ADH]urinaire 2 mU/h	2,31 $\pm$ 1,1	1,88 $\pm$ 0,72

BILAN HORMONAL à 25°C et à 35°C.

d) les clearances (voir tableau n°33)

- la clearance de l'eau libre

Comme à 25°C, on note une diminution du débit urinaire $\dot{V}$ pendant l'exercice à 35°C : $\dot{V}$ passe de $1,22 \pm 0,80$ ml/min avant l'exercice à $0,65 \pm 0,70$ ml/min après l'exercice.

La diminution de la négativité de C_{H_2O} , qui était à la limite de la signifi-
cation ($P < 0,05$) à 25°C, devient très significative ($P < 0,01$) à 35°C pendant la
période englobant l'exercice musculaire.

- la clearance de l'urée

De même, il existe une diminution significative ($P < 0,05$) de $C_{urée}$ pendant
l'exercice musculaire.

TABLEAU N°33

ambiance thermique	$C_{H_2O} 1$ ml/min	$C_{H_2O} 2$ ml/min	$C_{urée} 1$ ml/min	$C_{urée} 2$ ml/min
25°C	$- 1,27 \pm 0,92$	$- 0,63 \pm 0,66^*$	$49,4 \pm 22,8$	$29,0 \pm 15,3^*$
35°C	$- 1,69 \pm 0,26$	$- 1,00 \pm 0,20^{**}$	$43,8 \pm 14,6$	$23,8 \pm 6,8^*$

CLEARANCES DE L'EAU LIBRE ET DE L'UREE

7 - Le bilan hydrique

a) le volume plasmatique (voir tableau n°34)

La diminution du volume plasmatique après exercice à 35°C est peu différente
de celle observée à 25°C puisque % ΔVP à 35°C ($10,27 \pm 2,30$ %) est légèrement
inférieure à % ΔVP à 25°C ($12,70 \pm 4,40$ %) mais de façon non significative.

Si on ramène la variation absolue du volume plasmatique à la minute, on note
qu'il n'existe pas de différence significative entre 35°C et 25°C.

ambiance thermique	$VP 1$ 1	$VP 2$ 1	ΔVP 1	% ΔVP	$\Delta VP / \Delta t$ ml/min
25°C	$3,34 \pm 0,22$	$2,92 \pm 0,26^*$	$0,41 \pm 0,20$	$12,70 \pm 4,40$	$10,01 \pm 6,70$
35°C	$3,34 \pm 0,24$	$3,01 \pm 0,22^*$	$0,33 \pm 0,11$	$10,27 \pm 2,30$	$9,77 \pm 5,70$

TABLEAU N°34

b) la perte de poids

Les valeurs individuelles de la perte de poids à 35°C sont représentées dans le tableau n°35.

TABLEAU N° 35

sujets	perte de poids g	<u>perte de poids</u> Δt g/min
MEL	941	18,2
MEF	610	17,0
WEL	1064	16,1
LAS	700	16,7
DEL	381	14,1
TUR	403	16,1
DRA	375	14,1
JOA	798	15,6
moyenne	658 ± 263	15,9 ± 1,4

En moyenne, les pertes de poids sont donc légèrement inférieures à 35°C (658 ± 263,0 g) par rapport à 25°C (696,6 ± 327,0 g), mais pour une durée d'exercice plus courte à 35°C.

Les pertes de poids ramenées à la minute sont donc très significativement supérieures ($P < 0,01$) à 35°C : 15,9 ± 1,4 g/min par rapport à 25°C : 12,66 ± 1,86 g/min).

Il existe également à 35°C une excellente corrélation ($r = 0,99$) entre la perte de poids globale et la durée de l'exercice. La droite de régression est obtenue par l'équation : $y = - 62,21x + 17,83$ avec $\begin{matrix} Y = \text{perte de poids (g)} \\ X = \text{durée (min)} \end{matrix}$

c) les pertes métaboliques respiratoires

Ces pertes sont légèrement inférieures à 35°C (1,47 ± 0,82 g/min) par rapport à 25°C (1,64 ± 0,32 g/min), mais de façon non significative.

d) les pertes en eau (voir tableau n°36)-pertes par voie respiratoire :

Il n'y a pas de différence significative entre 35°C (2,44 ± 0,60 g/min) et 25°C (2,33 ± 0,31 g/min).

- pertes par voie cutanée

Les pertes sudorales sont significativement plus élevées ($P < 0,05$) à 35°C (12,08 ± 2,02 g/min) qu'à 25°C (8,69 ± 2,05 g/min).

La corrélation ($r = 0,90$) à 35°C entre la perte de poids par minute et le débit sudoral est aussi bonne qu'à 25°C ($r = 0,93$).

- pertes par voie rénale :

Elles sont moins élevées à 35°C ($0,65 \pm 0,71$ g/min) qu'à 25°C ($0,98 \pm 0,71$ g/min), mais de façon non significative.

- la perte totale en eau est significativement plus élevée ($P < 0,05$) à 35°C ($15,15 \pm 1,91$ g/min) qu'à 25°C ($12,00 \pm 2,09$ g/min).

TABLEAU N°36

ambiance thermique	pertes pulmonaires g/min	pertes cutanées g/min	pertes rénales g/min	perte totale en eau g/min
25°C	$2,33 \pm 0,31$	$8,69 \pm 2,05$	$0,98 \pm 0,71$	$12,00 \pm 2,09$
35°C	$2,44 \pm 0,60$	$12,08 \pm 2,02$	$0,65 \pm 0,71$	$15,15 \pm 1,91$

ECHANGES AVEC L'EXTERIEUR

La figure n°30 permet de comparer les moyennes des pertes de poids par minute et les valeurs des pertes en eau à 25°C et à 35°C . L'augmentation de la déperdition hydrique à 35°C est due à l'augmentation absolue du débit sudoral **avec une légère augmentation** de sa participation dans la perte totale en eau : **80 %** à 35°C pour **73 %** à 25°C .

Mais, alors qu'à 25°C la perte de poids par minute était un excellent reflet de la perte totale en eau ($r = 0,95$), cette corrélation n'est plus aussi bonne ($r = 0,80$) à 35°C .

e) la production d'eau

Les valeurs moyennes de la production d'eau à 25°C et à 35°C résultant des transformations internes sont rassemblées dans le tableau n°37.

Cette eau produite au cours de l'exercice musculaire est peu différente à 25°C et à 35°C ($12,37 \pm 0,88$ g/min et $11,33 \pm 2,26$ g/min).

La figure n°31 permet de constater que, comme à 25°C , la plus grande partie de la production hydrique revient à l'eau liée au glycogène (81,3 % à 25°C et 80,4 % à 35°C). La glycolyse fournit 18 % de l'eau produite à 25°C et à 35°C . A 35°C , il y a une augmentation du pourcentage de l'eau produite par lipolyse (1,6 %) par rapport à 25°C (0,5 %).

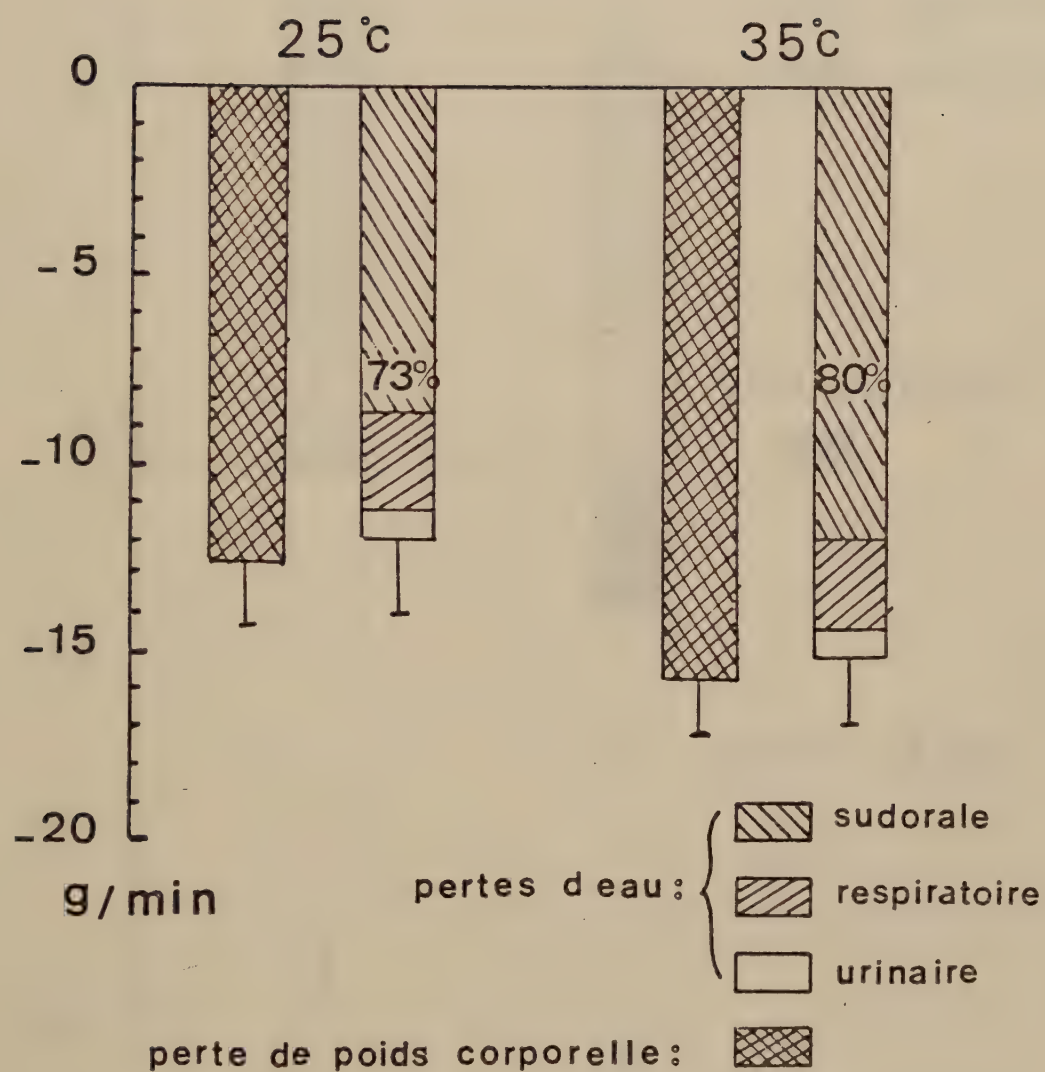


figure n° 30

Perte de poids (g/min) et perte totale en eau (g/min) à 25°C et à 35°C

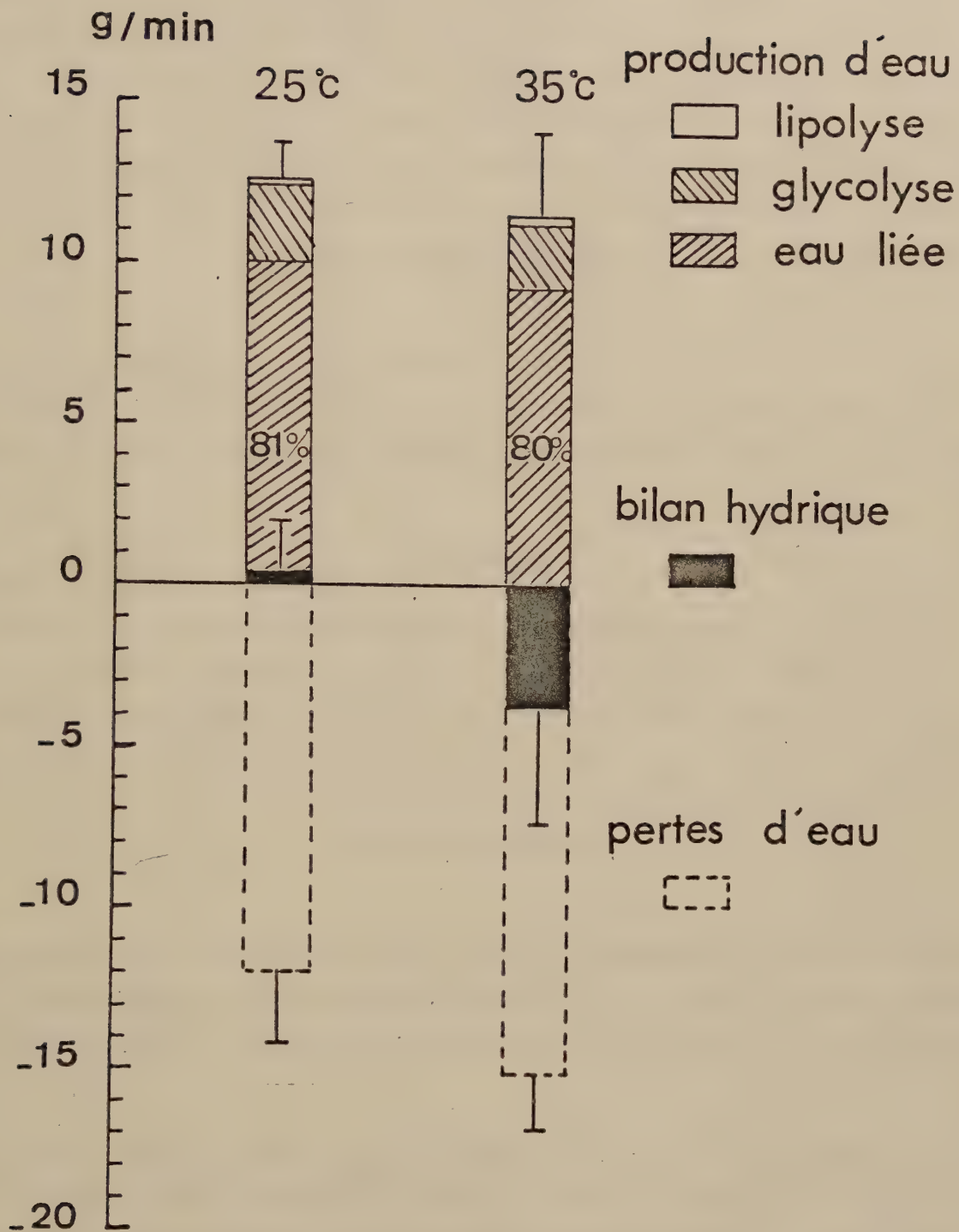


figure n° 31

Production d'eau (g/min) et bilan hydrique (g/min) à 25°C et à 35°C

TABLEAU N°37

ambiance thermique	GLUCIDES		LIPIDES	PROTIDES	PRODUCTION
	eau liée g/min	glycolyse g/min	lipolyse g/min	protéolyse g/min	D'EAU g/min
25°C	10,06 $\pm$ 0,74	2,22 $\pm$ 0,16	0,07 $\pm$ 0,09	0,02 $\pm$ 0,01	12,37 $\pm$ 0,88
35°C	9,11 $\pm$ 2,00	2,01 $\pm$ 0,44	0,18 $\pm$ 0,21	0,02 $\pm$ 0,01	11,33 $\pm$ 2,26

TRANSFORMATIONS INTERNES

f) le déficit hydrique (tableau n°38)

Le déficit hydrique à 35°C (3,81 $\pm$ 3,54 g/min) est significativement plus important ($P < 0,05$) qu'à 25°C où ce déficit est légèrement négatif (- 0,27 $\pm$ 1,80 g/min).

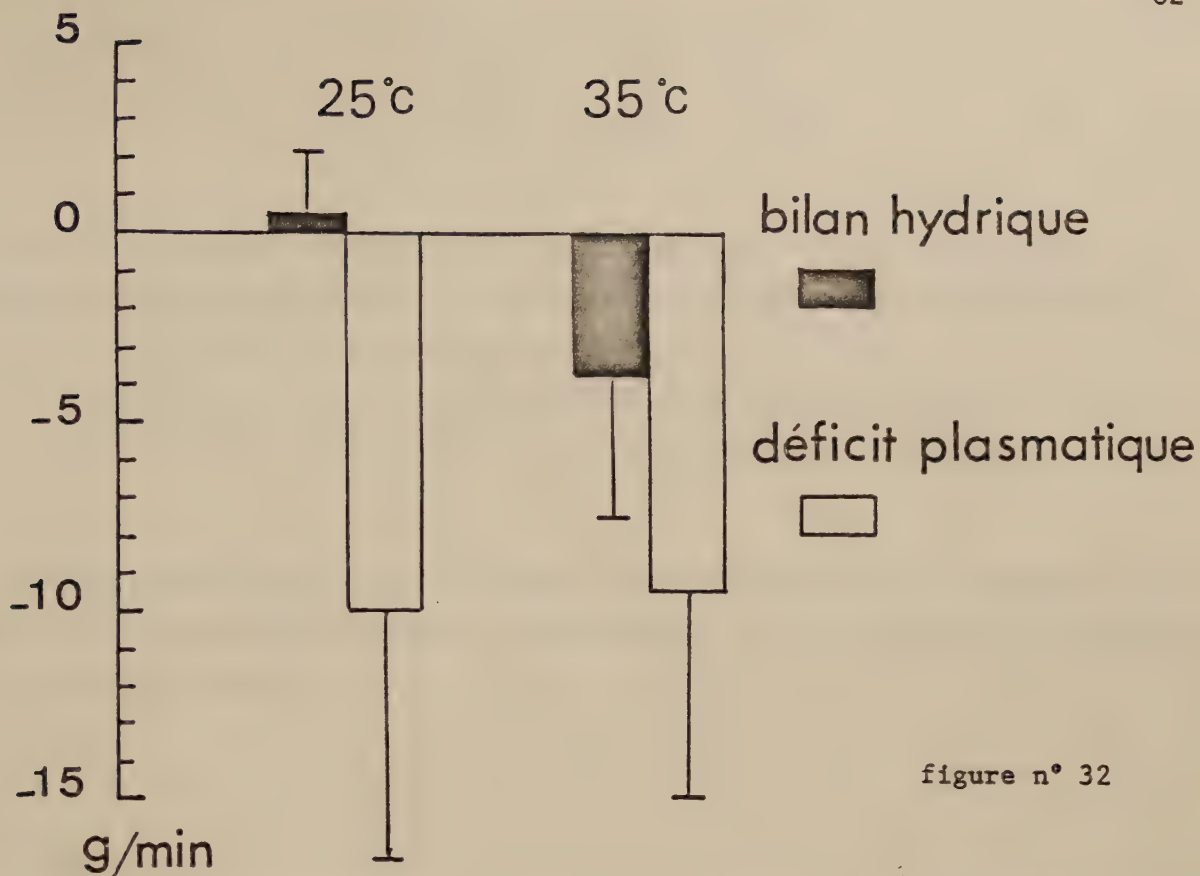
TABLEAU N°38

ambiance thermique	25°C	35°C
déficit hydrique (g/min)	- 0,27 $\pm$ 1,80	+ 3,81 $\pm$ 3,54

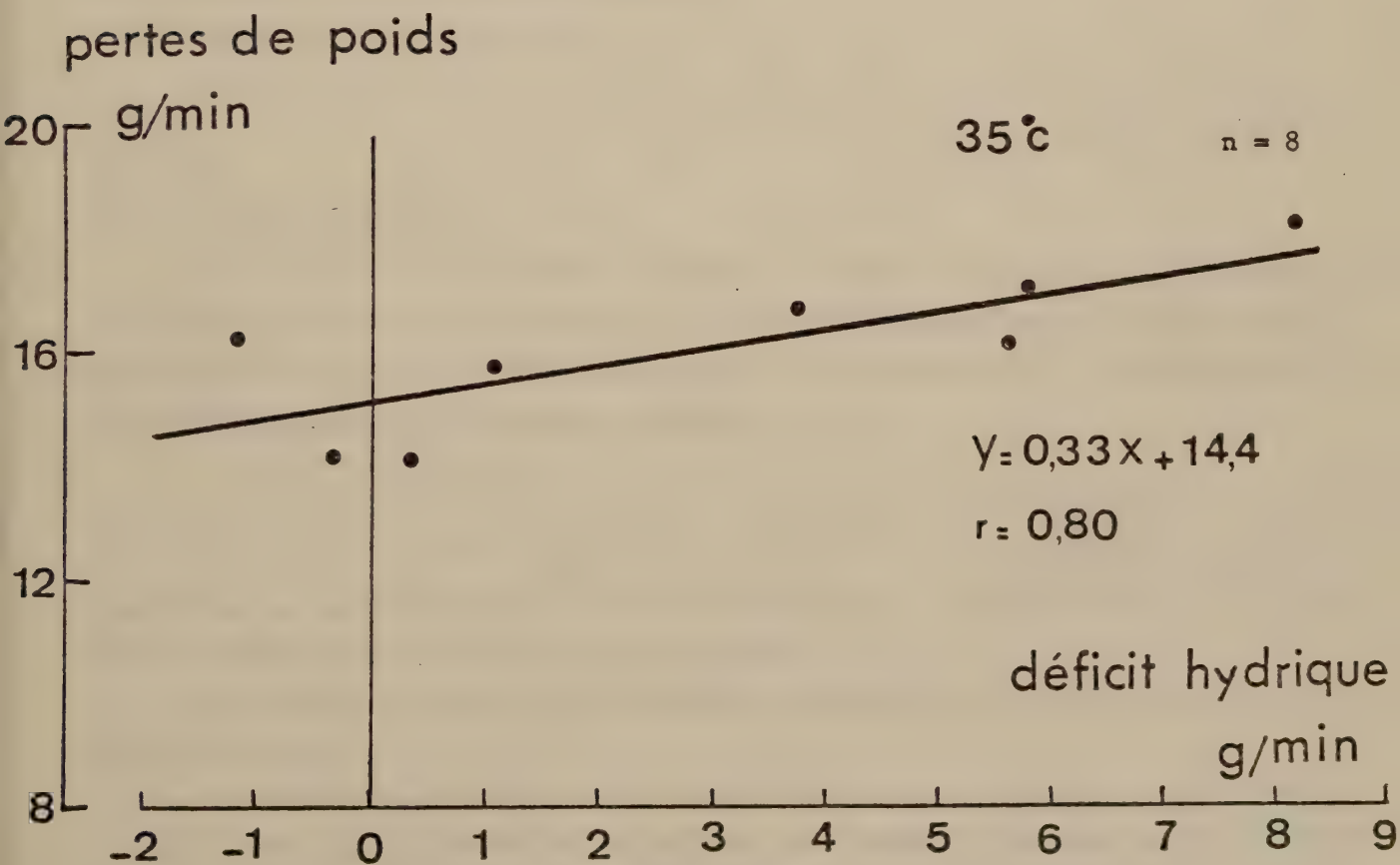
LE DEFICIT HYDRIQUE

Si on étudie la corrélation entre le déficit hydrique et la perte de poids à 35°C (figure n°33), on note que cette corrélation ($r = 0,80$) est bien meilleure qu'à 25°C ($r = 0,36$). La perte de poids est donc un assez bon reflet du déficit hydrique à 35°C.

La figure n°32 permet de comparer le déficit hydrique avec le déficit plasmatique à 25°C et à 35°C. La différence entre les déficits hydrique et plasmatique représente une rétention d'eau dans le secteur extravasculaire qui paraît donc moins importante à 35°C qu'à 25°C.



Comparaison entre le bilan hydrique (g/min) et le déficit plasmatique (g/min)
à 25°C et à 35°C



Corrélation entre les pertes de poids et le déficit hydrique à 35°C

CHAPITRE IV : DISCUSSION

Avant d'envisager l'étude des résultats obtenus, il semble important de critiquer les différents aspects techniques de ce travail, et principalement :

- le recueil de certains paramètres
- le choix des sujets d'expériences et leur classification
- les expériences réalisées et leur caractère physiologique.

Dans un second temps seront étudiées les interactions des mouvements hydriques sur les capacités de transfert, de transport et de transformation énergétiques de la "machine humaine".

I - TECHNIQUES EXPERIMENTALES

1) Le recueil des différents paramètres

- les paramètres ventilatoires

L'erreur dans l'estimation de $\dot{V}O_2$ fournie par le calculateur est de 2 % compte tenu d'une erreur sur la détermination de $\dot{V}_E$ liée au système pneumotachographique.

- la fréquence cardiaque

Les mesures de la fréquence cardiaque au cours de l'exercice sont effectuées par deux techniques différentes, et les valeurs obtenues par l'enregistrement graphique correspondent étroitement aux valeurs données par le cardi tachymètre.

- le bilan biologique sanguin et urinaire

. l'hématocrite

Les valeurs de l'hématocrite sont importantes car elles permettent d'estimer les variations du volume plasmatique (chap. II, p.16). Cependant les valeurs calculées ne sont présentées qu'à titre indicatif, la détermination de l'hématocrite faisant l'objet de plusieurs critiques :

+ le manque de précision du résultat numérique qui est représenté par un chiffre entier

+ la mesure de la valeur de l'hématocrite sur sang veineux et non sur sang total ; pour cela il aurait fallu utiliser un facteur de correction égal à 0,91 (71). Cependant l'absence de correction ne présente aucun inconvénient puisque seule est considérée sa variation relative.

+ la même remarque peut être faite à propos de la correction du phénomène de "trapping" plasmatique par les globules rouges (en multipliant la valeur de l'hématocrite par un facteur de correction égal à 0,96) réalisée par certains auteurs (71) ou de celle due à la variation du volume globulaire (72) (6).

. les pertes urinaires pendant l'exercice

Le temps existant entre les mictions effectuées à 15 heures et 10 minutes après la fin de l'exercice constitue une période englobant l'exercice musculaire et en moyenne 40 minutes de non exercice (30 min avant, 10 min après). Compte tenu de ce fait, les valeurs des débits, des variations de l'osmolalité et des ionogrammes urinaires ne peuvent être considérées comme le reflet des seuls phénomènes survenus pendant l'exercice.

- les températures corporelles

L'incertitude qui touche la détermination des températures corporelles, que ce soit pour T_{re} ou pour T_{sk} , est de l'ordre de 1/10 de °C. La valeur moyenne de T_{sk} obtenue à partir de la température cutanée mesurée en 10 points du corps, affectée d'un coefficient de pondération, paraît critiquable au cours de l'exercice (17).

- la perte de poids

Le degré de précision dans l'évaluation de la perte de poids est très important compte tenu de la grande sensibilité de la balance (1 g).

Cependant on fait une erreur par défaut dans son estimation, la pesée prenant en compte la quantité de sueur qui ayant ruisselé tombe sur le plateau de la balance et ne s'évapore pas, ainsi que celle qui reste sur le corps du sujet et qui imprègne son short à la fin de l'exercice. Il faut toutefois signaler que cette quantité est relativement faible, le plateau de la balance ne présentant qu'exceptionnellement des flaques de sueur en fin d'exercice.

2) Le choix des sujets d'expériences et leur classification

Ces sujets sont issus de deux populations à priori différentes :

- . 6 cyclistes amateurs, bien entraînés aux compétitions
- . 8 élèves de l'ESSA, pratiquant des activités sportives régulières, mais d'intensité modérée.

Il existe en effet des différences portant sur :

- . les caractéristiques biométriques : pour une taille sensiblement équivalente ($1,73 \pm 5$ cm), les 6 cyclistes présentent un poids nettement inférieur (63 ± 4 kg) à celui des autres sujets (74 ± 4 kg)
- . la consommation d' O_2 maximale est plus élevée chez les cyclistes ($4,70 \pm 0,20$ l/min) que chez les 8 étudiants ($3,80 \pm 0,30$ l/min)
- . l'entraînement (celui des cyclistes est très supérieur)

. l'endurance : dans l'ensemble, les performances accomplies par les cyclistes (à puissance relative comparable) sont supérieures à celles réalisées par les autres sujets.

Mais dans chaque population, il existe d'importantes variations individuelles. Par exemple 2 cyclistes (MAR) et (DUT), en dépit d'un entraînement intense, semblent assez peu endurants ; mais il faut tenir compte d'un degré de motivation qui semblait inférieur à celui des autres cyclistes. De même parmi les 8 étudiants, certains sujets ont présenté des performances identiques à celles des cyclistes (à puissance relative comparable), mais d'autres ont accompli des performances médiocres en raison d'une aptitude à l'endurance limitée.

C'est pour cette raison que l'endurance a été choisie comme critère de classification. Les courbes d'ASTRAND et RODAHL utilisées à cet effet représentent les durées pendant lesquelles des exercices de différentes intensités relatives peuvent être supportés . Cependant ces courbes sont sujettes à caution du fait :

- . de leur réalisation à partir d'un petit nombre de résultats
- . des niveaux de motivation différents, alors que la motivation est un des facteurs déterminants de l'endurance (7).
- . de l'absence de courbes intermédiaires entre celle des sujets très endurants et celle des sujets peu endurants d'où parfois la difficulté à classer certains sujets. Néanmoins cette classification a pour avantage d'obtenir 3 groupes assez homogènes en ce qui concerne l'endurance et de pouvoir comparer les résultats obtenus par chacun d'entre eux.

3) Les expériences réalisées et leur caractère physiologique

On considèrera successivement l'exercice, les agressions extérieures et l'équilibration hydrique avant l'exercice.

a) l'exercice

. le type de l'exercice : l'exercice musculaire accompli sur ergocycle semble être une technique expérimentale valable pour mesurer l'endurance d'un sujet. D'une part il n'a pas été trouvé de différence significative de $\dot{V}O_2$, que l'exercice soit accompli sur ergocycle ou lors d'une course sur tapis roulant (5) et d'autre part, c'est un moyen relativement simple bien adapté à la mesure de la perte de poids en continu. Il faut cependant souligner que les cyclistes sont particulièrement avantagés du fait d'une musculature des membres inférieurs parfaitement adaptée à ce type d'exercice.

. la puissance relative de l'exercice : au cours de toutes les expériences, on a imposé une puissance de travail qui avoisine 80 % de $\dot{V}O_2$ max. Cependant, compte tenu d'un réglage d'intensité par des paliers séparés de 300 kgm/min, des

puissances immédiatement supérieures (1500 ou 1800 kgm/min) ont été sélectionnées pour les 6 cyclistes et immédiatement inférieures (1050 ou 1200 kgm/min) pour les autres sujets. En dépit des variations individuelles, la moyenne des puissances relatives se situe au pourcentage souhaité.

b) les agressions extérieures

En plus de l'exercice, il existe des perturbations d'ordre organique et psychologique :

. les perturbations organiques

- la mise en place du cathéter intraveineux peut entraîner des modifications biologiques plus ou moins importantes : augmentation de la fréquence cardiaque, décharge d'adrénaline (23). C'est pour cette raison qu'un délai de 20 minutes est respecté entre ce geste et le premier prélèvement sanguin.
- la sonde rectale est bien tolérée lors de l'exercice.
- le masque par contre, quand il est trop serré, entraîne à la longue des phénomènes douloureux.
- de même la selle, si sa hauteur est mal réglée, ou si les sujets ne sont pas habitués à ce type d'exercice, entraîne l'apparition de stimuli nociceptifs susceptibles de diminuer fortement la motivation du sujet.

. les perturbations psychologiques

Le caisson thermoclimatique, avec ses parois teintées en noir et sa baie vitrée laissant passer faiblement la lumière du jour, crée un cadre psychologiquement angoissant pour le sujet d'expérience. Pour atténuer ce phénomène qui peut limiter la performance, un sujet est placé en permanence dans le caisson pour enregistrer la température cutanée et prodiguer des encouragements afin de retarder au maximum l'arrêt de l'exercice lors de l'épuisement.

c) l'équilibration hydrique avant l'exercice

Cette équilibration en eau qui correspond à la perte urinaire recueillie à 15 heures, a pour but d'obtenir, 10 minutes après la fin de l'exercice, une quantité d'urine suffisante pour les différents dosages. Cette quantité d'eau peu importante (50 ml en moyenne) est probablement absorbée 20 minutes après son ingestion quand commence l'exercice (15) et son influence sur l'hydratation du sujet est vraisemblablement négligeable.

II - L'IMPORTANCE DES MOUVEMENTS HYDRIQUES ET LEUR INTERACTION AVEC L'APTITUDE ENERGETIQUE

Compte tenu de la spécialisation biologique de certains systèmes et organes, l'aptitude énergétique de la "machine humaine" peut se subdiviser en 3 aptitudes partielles (figure n°3) :

- . l'aptitude à transférer des substrats ou des déchets entre milieux intérieur et extérieur par l'intermédiaire des poumons, du tissu cutané, des reins et du tube digestif.
- . l'aptitude à transporter et à distribuer l'énergie chimique potentielle par le système cardiovasculaire.
- . l'aptitude à transformer celle-ci en énergie mécanique par l'appareil locomoteur.

Au cours de l'exercice musculaire, les échanges avec l'extérieur et les réactions métaboliques cellulaires vont provoquer des mouvements hydriques susceptibles de retentir sur le système cardiovasculaire.

Seront étudiés successivement : les échanges avec l'extérieur, l'adaptation cardiocirculatoire, les transformations internes et en dernier lieu le bilan hydrique et l'importance de la rétention d'eau dans le secteur extravasculaire comme facteur limitant l'aptitude à l'endurance.

1) Les échanges entre milieux intérieur et extérieur

On considérera successivement les pertes pulmonaires, cutanées et rénales ; les pertes digestives sont probablement négligeables pendant les durées d'exercice observées du fait d'une diminution des sécrétions digestives au cours de l'exercice musculaire intense en rapport avec la baisse marquée du débit sanguin splanchnique (64).

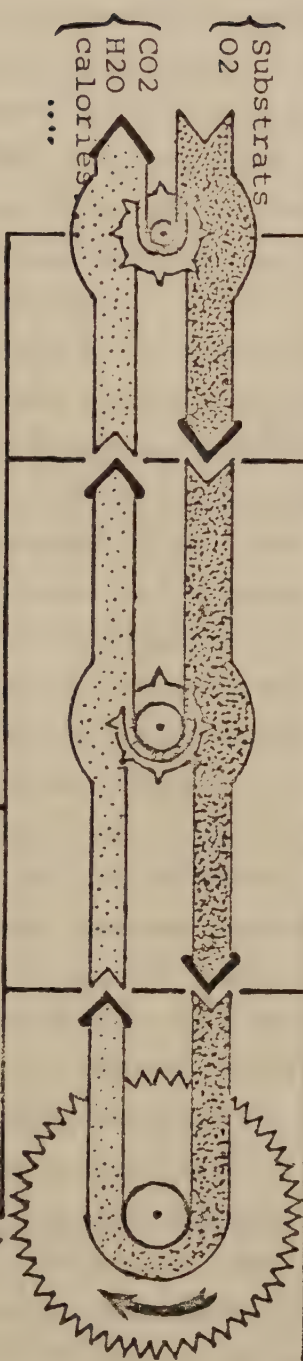
a) les pertes d'origine pulmonaire

Très peu d'auteurs ont évalué les pertes de poids d'origine respiratoire au cours de l'exercice ; or il apparaît que ces pertes peuvent représenter une fraction appréciable de la perte de poids corporelle (49). Elles sont de deux ordres : une perte hydrique et une perte de poids par échanges gazeux respiratoires.

La perte en eau liée aux échanges thermiques (35) est de l'ordre de 2,2 g/min à 3 g/min sans qu'il y ait de différence significative entre les 3 groupes de sujets. Elle représente 20 % de la déperdition hydrique totale et de ce fait, ne doit pas être négligée dans l'estimation de cette déperdition, en accord avec certains auteurs (49).

La perte de poids par échanges gazeux respiratoires (perte métabolique respiratoire) correspond à la différence entre le poids de CO_2 éliminé et le poids d' O_2 absorbé. Les résultats obtenus (chap. III, p.51) montrent qu'elle est de l'ordre de 1,30 g/min à 2 g/min, ce qui représente 9 à 15 % de la perte de poids corporelle ;

ECHANGEURS	TRANSPORTEUR	TRANSFORMATEUR
transfert entre milieux intérieur et extérieur	transport et distribution	transformation en énergie mécanique
Poumons Peau et annexes Reins Tube digestif	Appareil cardio-circulatoire	Appareil locomoteur



perturbations de l'équilibre hydrique

figure n° 34

APTITUDE ENERGETIQUE

elle doit donc être prise également en considération si on veut estimer valablement les pertes sudorales et les pertes en eau d'origine respiratoire (chap. II, p.19).

L'ambiance thermique plus élevée (35°C) ne semble pas influencer l'importance de ces pertes (chap. III, p.78), ce qui est probablement dû au fait que les débits ventilatoires ne sont pas significativement différents à 25°C et à 35°C (chap. III, p.66). En effet, certains auteurs ont trouvé un accroissement linéaire entre les pertes d'origine pulmonaire et l'intensité de l'exercice, si celle-ci est supérieure à 70 % de $\dot{V}O_2$ max (49). D'autres auteurs ont mis en évidence un accroissement de type exponentiel entre $\dot{V}_E$ et la puissance relative de l'exercice (67). Tout ceci est en faveur d'un accroissement des pertes d'origine pulmonaire avec l'augmentation du débit ventilatoire.

$\dot{V}_E$ est égal au produit de la fréquence respiratoire par le volume courant expiré : $\dot{V}_E = f \times V_T$. Les résultats obtenus (chap. III, p.27) montrent que l'élévation régulière de $\dot{V}_E$ entre la 10^{ème} minute de l'exercice et l'épuisement est due à une augmentation de la fréquence respiratoire en dépit d'une diminution concomitante du volume courant allant dans le sens du maintien d'une ventilation alvéolaire constante au cours de l'exercice (24).

Tout individu adapte spontanément sa fréquence respiratoire et son volume courant de façon à ce que le niveau ventilatoire demandé soit atteint avec l'efficacité maximale, c'est-à-dire pour une dépense d'énergie minimale par les muscles respiratoires (47). Or si on effectue le rapport $\frac{\dot{V}O_2}{\dot{V}_E}$, celui-ci est nettement supérieur pour les groupes I et II (0,034) par rapport au groupe III (0,027). Il apparaît donc que cette efficacité respiratoire est moins importante pour les sujets peu endurants puisque pour une consommation d'oxygène inférieure ils présentent un débit ventilatoire peu différent de celui des sujets plus endurants. Cette hyperventilation relative ($QR > 1$, taux des bicarbonates sanguins effondré) est susceptible d'augmenter la consommation d'oxygène par les muscles respiratoires au détriment des autres muscles en activité, ce qui constituerait un facteur limitant l'endurance pour certains auteurs (54).

b) les pertes d'origine cutanée

L'énergie chimique utilisée au cours de l'exercice est transformée dans la cellule musculaire en énergie mécanique et en énergie calorique avec un rendement mécanique de l'ordre de 23 % (52). L'accumulation de calories entraîne une augmentation de la température interne, qui est contrôlée par des mécanismes tout particulièrement axés sur la protection des tissus contre l'échauffement (31). La thermorégulation a pour but d'éviter une augmentation trop importante de cette température interne qui serait néfaste aux réactions enzymatiques intracellulaires (27).

La circulation du sang permet de transporter la chaleur produite en excès de la zone profonde de l'organisme à sa surface. Lorsque la contrainte thermique est suffisamment importante, les glandes sudoripares sont stimulées et l'évaporation de

la sueur produite refroidit la peau. Si l'intensité de l'exercice augmente, c'est l'évaporation qui assure l'évacuation de la chaleur supplémentaire, les pertes de chaleur par irradiation et convection étant pratiquement constantes (52). L'intensité de la sudation permet d'apprécier l'intensité de la contrainte calorique imposée, que la sueur éliminée se soit complètement évaporée ou ait simplement ruisselé.

Les résultats obtenus au cours des expériences (chap. III, p.55^{et}78) montrent un débit sudoral important pour :

- . les sujets endurants
- . les sujets placés sous une ambiance thermique élevée (35°C).

Ces faits rapportés par plusieurs auteurs (66) (33) ont amené NIELSEN à énoncer deux théories intéressantes à étudier en fonction des résultats acquis au cours de ces expériences.

- à condition ambiante constante, l'intensité de la sudation est directement fonction de la production de chaleur (NIELSEN 1966)(53).

Lors des expériences, les sujets ayant une forte puissance aérobie maximale (les 6 cyclistes) travaillent avec une puissance absolue d'exercice élevée (1500 ou 1800 kgm/min). Leur débit sudoral important, dû à une production calorique supérieure, fait que leur élévation de T_{re} ramenée à la minute (0,035°C/min) n'est pas différente de celle des sujets moins endurants, en accord avec certains auteurs (66).

Les résultats obtenus dans ce travail montrent de plus que, pour une même puissance absolue de travail (par exemple 1200 kgm/min), les sujets les plus endurants présentent un débit sudoral supérieur qui peut être 2 fois plus élevé (exemple : MEL 12g/min et DEL 6 g/min), ceci étant en faveur d'une thermolyse plus efficace. Ces résultats sont en accord avec ce que pensent certains auteurs (33) qui estiment que la quantité de sueur émise par un sujet au repos en réponse à une contrainte calorique donnée, est d'autant plus élevée qu'il est acclimaté à la chaleur ou à l'exercice musculaire.

L'augmentation de la température interne (particulièrement quand l'exercice est intense), malgré l'adaptation de la déperdition calorique, pose le problème de son interprétation en tant que facteur limitant de l'endurance. Pour certains auteurs, cette augmentation de température limite l'aptitude aux exercices prolongés (10) (22). Dans cette hypothèse, les sujets les plus endurants présenteraient une meilleure tolérance à cette élévation de température ; les résultats obtenus (chap. III, p.41) montrent effectivement une variation absolue de T_{re} plus importante pour ces sujets. Mais il est possible de considérer également l'élévation de la température interne, non plus comme un facteur limitant, mais comme la conséquence normale de l'élévation du métabolisme (25), les sujets les

plus aptes présenteraient un stockage moins important de la chaleur. Ce qui est en accord avec les résultats obtenus puisque les sujets les plus endurants, quand ils ne travaillent pas avec une puissance relative submaximale, présentent une élévation de T_{re} par minute moins élevée (COU : $0,020^{\circ}\text{C}/\text{min}$; MEL : $0,025^{\circ}\text{C}/\text{min}$; WEL : $0,016^{\circ}\text{C}/\text{min}$) que les sujets peu endurants (DEL : $0,039^{\circ}\text{C}/\text{min}$; TUR : $0,042^{\circ}\text{C}/\text{min}$). Cependant la valeur moyenne plus élevée pour les sujets du groupe I ($0,035^{\circ}\text{C}/\text{min}$) est due à 2 sujets (DUM) et (SAV) qui travaillent avec une intensité submaximale (95 % et 97 % de $\dot{V}O_2 \text{ max}$), entraînant une élévation de T_{re}/min très importante ($0,043^{\circ}\text{C}/\text{min}$).

- pour un exercice de puissance donnée, l'intensité de la sudation est fonction directe de la température ambiante (NIELSEN 1966)(53).

Lors de nos expériences sous une température ambiante plus élevée (35°C), $\overline{T_{sk}}$ se situe aux environs de 34°C pour l'ensemble des sujets ($\overline{T_{sk}} = 31,5^{\circ}\text{C}$ à 25°C) et les débits sudoraux, comme le montre la figure n°35, augmentent significativement chez tous les sujets par rapport à ceux observés à 25°C (chap. III p.78). Pour expliquer ce phénomène, certains auteurs pensent que lorsque $\overline{T_{sk}}$ est en dessous de 33°C , il en résulte une action inhibitrice des récepteurs sensibles au froid sur les formations qui commandent les processus de thermolyse. Quand $\overline{T_{sk}}$ est supérieure à 33°C , sa valeur n'affecte pas la sudation, et les récepteurs sensibles à la chaleur n'exercent aucune influence sur la sudation (11).

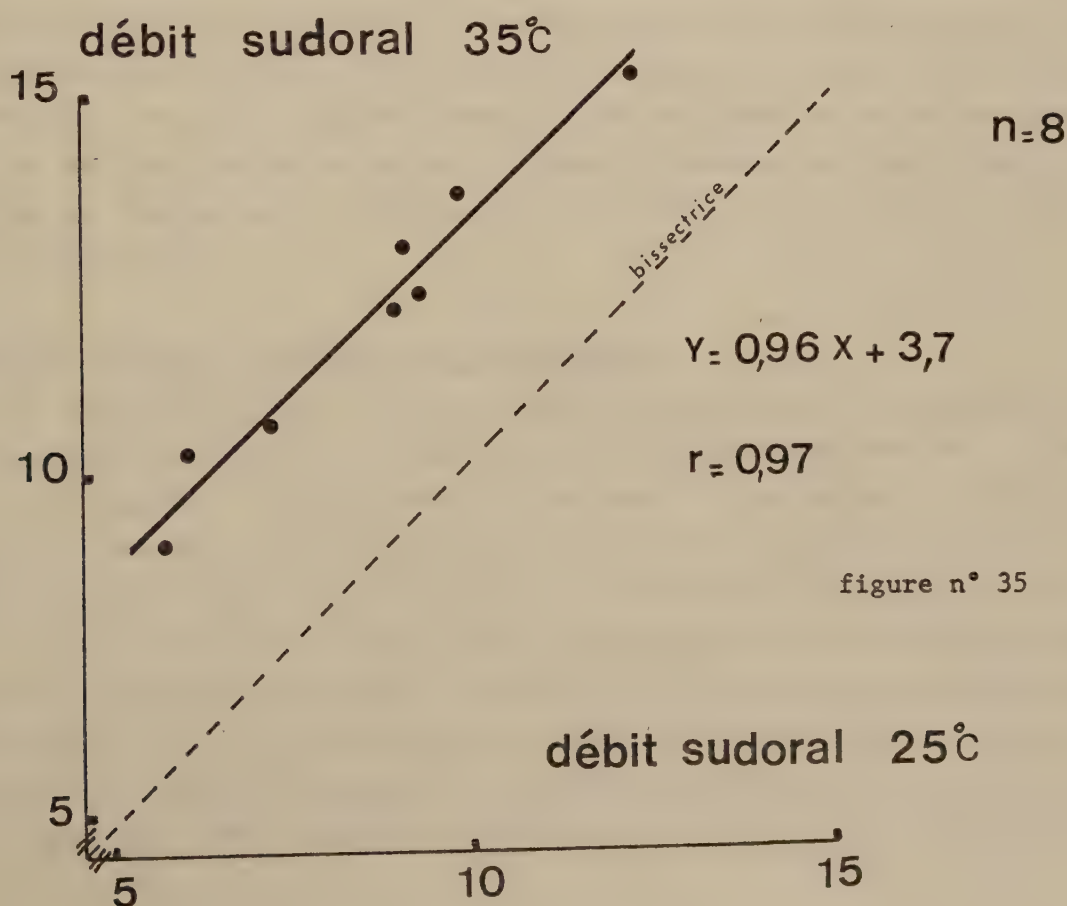


figure n° 35

La baisse de la température cutanée observée au cours des 5 premières minutes de l'exercice est vraisemblablement due à la mise en route de la sudation et aux mouvements de l'air provoqués par le pédalage qui entraînent une augmentation de la quantité de chaleur perdue par convection.

Après avoir étudié les facteurs susceptibles de faire varier la réponse sudorale, il faut souligner l'importance quantitative des pertes en eau par voie cutanée puisqu'elles représentent à 25°C et à 35°C 80 % des pertes totales en eau.

c) les pertes rénales

Le débit urinaire observé pendant l'exercice musculaire représente la fraction la moins importante de la déperdition hydrique, que ce soit à 25°C ou à 35°C (5 à 8 % de la perte totale en eau). Ce débit, artificiellement augmenté puisqu'il inclut 40 minutes de non exercice, est cependant 2 fois moins important en moyenne que celui existant avant l'exercice (chap. III, p.50).

Différents facteurs sont susceptibles d'agir sur la baisse du débit urinaire au cours de l'exercice : d'une part la diminution de la filtration glomérulaire et d'autre part l'augmentation de la réabsorption de l'eau.

- la baisse de la filtration glomérulaire

Elle est entraînée par la baisse du débit sanguin rénal que plusieurs auteurs ont mis en évidence au cours de l'exercice musculaire (55) (75) (29). Certains d'entre eux ont montré qu'il existe une assez bonne corrélation entre la diminution du débit sanguin rénal et la puissance relative de l'exercice (28); cette réduction peut atteindre 80 % au cours d'un exercice intense (78). La puissance élevée des exercices réalisés pourrait donc expliquer en partie seulement la diminution du débit urinaire. En effet, comme le montre la figure n°36, il n'y a pas de corrélation entre la diminution du débit urinaire et la puissance relative de l'exercice.

- l'action des hormones du métabolisme hydrominéral

Que ce soit à 25°C ou à 35°C, les résultats montrent que la clearance de l'eau libre augmente au cours de l'exercice (C_{H_2O} passe en moyenne de - 1,30 ml/min à - 0,60 ml/min à 25°C, et de - 1,70 ml/min à - 1,00 ml/min à 35°C). Ce fait a déjà été rapporté par plusieurs auteurs (50) (9), qui par ailleurs mettent en évidence une augmentation du pouvoir antidiurétique du sang lors des exercices de courte durée contrastant avec une diminution de ce pouvoir au cours des exercices de longue durée comme le cross (9). Or les résultats obtenus dans ce travail (chap. III, p.49) montrent une augmentation significative des taux d'ADH plasmatique pendant l'exercice (x 5) à 25°C. Des faits semblables ont également été rapportés (68), mais pour des exercices à 100 % de $\dot{V}O_2$ max durant 6

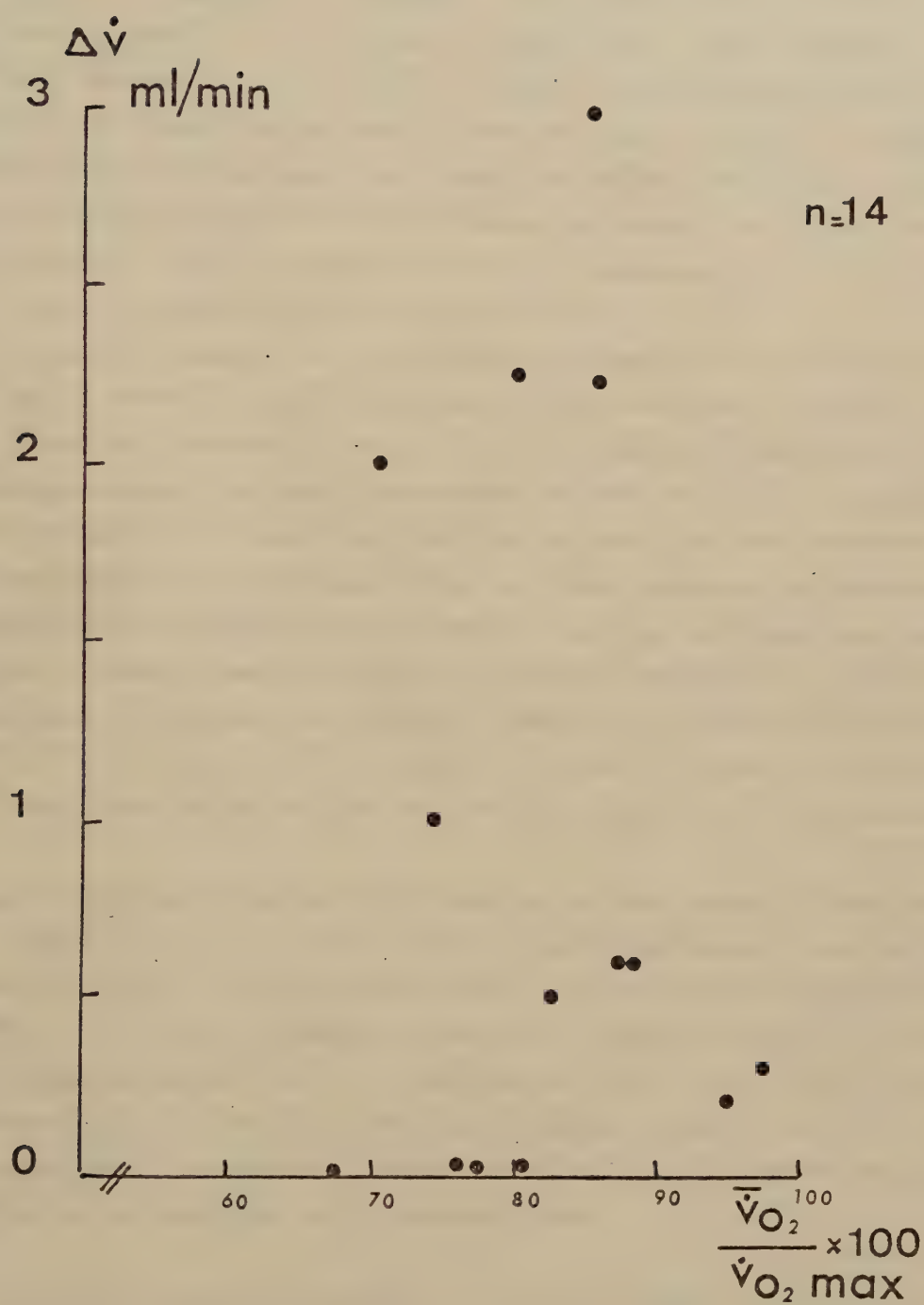


figure n° 36

Diminution du débit rénal en fonction de la puissance relative de l'exercice à 25°C pour les 14 sujets

minutes. Les 3 résultats recueillis à 35°C sont eux aussi en faveur d'une activité antidiurétique plasmatique élevée ($\times 17$). Cette augmentation des taux d'ADH plasmatique est vraisemblablement due à la stimulation du système antidiurétique hypothalamo-hypophysaire durant l'exercice en réponse à l'augmentation de l'osmolarité sanguine (en moyenne 5 à 7 mOsm/l) et à la diminution du volume plasmatique (5 % pour le groupe I ; 12 % pour le groupe III), comme le pensent certains auteurs (43). Cependant, il n'a pas été trouvé de corrélation entre l'augmentation relative des taux d'ADH et ces 2 facteurs. Mais il paraît difficile d'étudier la sécrétion d'ADH au cours de l'exercice compte tenu d'une diminution de son inactivation hépatique et de son élimination rénale, par baisse des débits sanguins hépatique (62) et rénal. De ce fait, l'augmentation de $C H_2O$ observée pendant l'exercice paraît difficilement explicable.

L'intérêt du dosage de la neurophysine plasmatique est qu'elle peut être un témoin de la sécrétion post-hypophysaire puisqu'elle est libérée en même temps que l'ADH et l'ocytocine, et qu'elle est dépourvue d'activité biologique de type vasopressique. Son taux plasmatique, stable au cours du nycthémère, permet d'interpréter de façon significative les modifications observées au cours de certaines conditions dynamiques (44). Une étude réalisée par certains auteurs (45) a montré une élévation significative du taux des neurophysines plasmatiques ($\times 1,5$) chez l'homme normal effectuant un exercice musculaire à près de 85 % de $\dot{V}O_2$ max pendant 20 minutes. Nos résultats montrent des augmentations plus importantes ($\times 3$ à 25°C et $\times 5$ à 35°C), mais il n'a pas été trouvé de corrélation entre les variations relatives des taux de neurophysine et d'ADH plasmatiques.

La diminution du rapport Na/K dans les urines pendant l'exercice à 25°C ou à 35°C (chap. III, p. 46 et 72) résulte vraisemblablement d'une action accrue de l'aldostérone, dont les taux plasmatiques augmentent très significativement ($\times 11$ à 25°C et $\times 7$ à 35°C) pendant l'exercice. Certains auteurs (70) estiment que cette augmentation est due à l'élévation de l'ARP et de l'ACTH, ainsi qu'à la diminution de l'inactivation hépatique. D'autres auteurs (18) (40) pensent que l'augmentation de la température corporelle au delà de 38°C provoque une nette augmentation de la sécrétion corticosurrénalienne.

L'ARP a été trouvée augmentée au cours de l'exercice par plusieurs auteurs (70) (8) (68) comme le montrent également nos résultats ($\times 4,5$ à 25°C et $\times 3,5$ à 35°C). Cette augmentation de l'ARP est probablement due à la diminution du débit sanguin rénal (70) et à d'autres facteurs tels que l'augmentation de l'activité du système nerveux sympathique.

L'augmentation significative du taux des hormones intervenant dans le métabolisme hydrominéral va dans le sens d'une diminution de la perte en eau par voie

rénale, vraisemblablement afin de préserver le capital hydrique de l'organisme pendant l'exercice.

La variation ramenée à la minute de ces taux hormonaux montre à 25°C une élévation moins importante pour les sujets très endurants. Ce phénomène n'est cependant pas significatif en raison d'un faible échantillonnage, mais il peut être compatible avec une plus grande sensibilité de ces sujets aux hormones du métabolisme hydrominéral.

A 35°C, l'élévation plus importante des taux hormonaux par minute est la conséquence probable de la déperdition hydrique très importante observée sous cette température ambiante.

2) L'adaptation cardiocirculatoire

Compte tenu de la déperdition hydrique externe et de la production d'eau métabolique, le volume plasmatique est susceptible de subir des variations pouvant retentir sur la fréquence cardiaque.

a) le volume plasmatique

Au cours de l'exercice musculaire, le volume plasmatique diminue dans des proportions variables en fonction du type d'exercice, de son intensité et des conditions ambiantes (60) (69) (71). Certains auteurs estiment qu'un déficit supérieur à 5 % s'accompagne d'une limitation de la performance.

Parmi les résultats présentés dans ce travail, de nombreux arguments sont en faveur de cette diminution.

Tout d'abord, une augmentation significative du taux des protéines (de 7 à 9 % en moyenne pour les 3 groupes) est notée. Cependant, de nombreux auteurs estiment que cette augmentation ne serait pas tant due à la perte d'eau plasmatique qu'à l'entrée de protéines du milieu extravasculaire dans le sang (30) (56) (71) (60). L'élévation de pression oncotique qui l'accompagne contribue d'ailleurs au maintien du volume vasculaire (60) (69).

Certains admettent toutefois qu'il existe parallèlement une perte liquidienne du milieu intravasculaire, principalement au début de l'exercice (21).

Par la suite, et malgré l'importance de la sudation, le volume plasmatique ne diminue que très lentement, les déperditions sudorales étant en grande partie compensées par l'apport liquidien extravasculaire (6) (21). Bien qu'une telle étude cinétique n'ait pas été réalisée dans ce travail, l'hypothèse d'une telle compensation se trouve parfaitement confirmée en ce qui concerne les sujets endurants. En effet, en dépit d'un exercice à très forte puissance, leur volume plasmatique ne subit qu'une diminution relativement faible (5 %), à l'image des

résultats obtenus par certains auteurs (65), ce qui contraste avec le déficit plasmatique beaucoup plus élevé chez les sujets peu aptes (13 %).

Il semble donc que les sujets très endurants aient une meilleure adaptation des mouvements hydriques au cours de l'exercice, tendant à préserver leur volume plasmatique d'une diminution trop importante.

L'effet d'une température ambiante plus élevée (35°C) ne semble pas modifier la diminution du volume plasmatique ramenée à la minute (environ 10 ml/min à 25°C et à 35°C), en dépit d'un débit sudoral significativement augmenté. Ce résultat est apparemment en contradiction avec ceux de certains auteurs (63) qui trouvent une diminution beaucoup plus importante du volume plasmatique lors d'un exercice sous une ambiance thermique de 43°C. Mais il est probable que pour une telle température, peu fréquente sous nos climats tempérés, la compensation du volume plasmatique existant à 35°C soit dépassée par l'intensité de la thermolyse, et de l'eau est ainsi prélevée en plus grande quantité dans le secteur plasmatique.

b) la fréquence cardiaque

A 25°C, la fréquence cardiaque évolue de façon linéaire à partir de la 10^{ème} minute jusqu'à sa valeur maximale. La pente de cette droite est d'autant plus marquée que l'intensité de l'exercice est importante et que l'aptitude à l'endurance est faible.

Au cours de l'exercice intense et prolongé, la réponse hémodynamique consiste en une augmentation de la fréquence cardiaque associée à une diminution du volume d'éjection systolique, le débit cardiaque augmentant très lentement (65) (79). Certains auteurs ont mis en évidence une diminution du volume systolique proportionnelle à celle du volume plasmatique (63). On peut donc penser que les sujets les moins endurants présentent une diminution plus marquée de leur volume d'éjection systolique, l'augmentation plus rapide de la fréquence cardiaque permettant de maintenir un débit suffisant. Les sujets très endurants, au contraire, présentent une élévation lente de leur fréquence cardiaque, qui les amène à un plafonnement cardiocirculatoire plus tardif ; pour des exercices de puissance inférieure (50 % de $\dot{V}O_2$ max), cette augmentation peut même devenir insignifiante (4).

L'effet d'une température ambiante de 43°C sur l'adaptation cardiocirculatoire a été étudiée par certains auteurs (63) qui mettent en évidence une diminution importante du volume plasmatique et du volume d'éjection systolique, la fréquence cardiaque s'élevant de façon plus marquée. Malgré cela, le débit cardiaque observé à 43°C est inférieur à ce qu'il était à 25°C dans les mêmes conditions d'exercice.

La température ambiante de 35°C utilisée pour cette étude est peut-être insuffisante pour faire apparaître de tels phénomènes. En effet, l'élévation de la fréquence cardiaque au cours de la première moitié de l'exercice n'est pas significativement différente de celle existant à 25°C ; elle paraît cependant légèrement plus marquée dans la deuxième moitié de l'exercice à 35°C. Cette augmentation plus rapide de la fréquence cardiaque ne semble pas explicable par la diminution plus importante du volume d'éjection systolique à 35°C, puisque les déficits plasmatiques sont peu différents à 25°C et à 35°C. A moins que le manque de précision dans l'estimation du volume plasmatique (chap. IV, p.83) ne laisse pas apparaître de différence significative entre ses valeurs obtenues sous les deux ambiances thermiques. D'autres facteurs seraient également susceptibles d'agir sur l'augmentation de la fréquence cardiaque, en particulier l'élévation de la température interne (74) ; en effet, cette augmentation ramenée à la minute est plus importante à 35°C (en moyenne 0,04°C/min) qu'à 25°C (0,03°C/min).

3) Les transformations internes

Les muscles squelettiques, lorsqu'ils sont au travail, peuvent multiplier par 50 l'intensité de leurs processus métaboliques par rapport à leur niveau de repos (3). Pour satisfaire de tels besoins, les cellules musculaires doivent utiliser une quantité importante de substrats énergétiques et d'oxygène, dont le reflet des consommations respectives est donné par QR et $\dot{V}O_2$. L'élimination de la chaleur et des déchets produits (eau métabolique, urée et CO_2) est accrue dans les mêmes proportions.

On étudiera successivement le métabolisme énergétique puis la production d'eau métabolique résultant de ces transformations internes.

a) le métabolisme énergétique

- la consommation d'oxygène

L'apport d'énergie par la voie aérobie est bien supérieur à celui de la voie anaérobie ; "l'oxygène constitue la clé donnant accès aux grands stocks d'énergie des cellules et c'est la quantité d'oxygène dont peuvent disposer les cellules musculaires au travail qui détermine l'aptitude à l'endurance" (7).

Au cours des premières minutes de l'exercice, on observe pour tous les sujets une augmentation rapide et importante de la consommation d'oxygène ; à partir de la 5^{ème} minute, $\dot{V}O_2$ continue d'augmenter lentement (en moyenne de 250 ml) jusqu'à la fin de l'exercice. La même constatation est faite par certains auteurs (65) qui ont fait travailler des sujets à 75 % de $\dot{V}O_2$ max pendant 180 minutes, alors qu'à 50 % de $\dot{V}O_2$ max, le sujet atteint un état stable de $\dot{V}O_2$ et de fréquence cardiaque (4).

Cette augmentation peut s'expliquer par l'intensité élevée de l'exercice

qui ne permet pas aux sujets de rester en état stable puisque parallèlement il existe une augmentation des fréquences cardiaque et respiratoire, de la ventilation pulmonaire et une diminution du volume plasmatique.

Il apparaît alors que les sujets les plus endurants, à puissance élevée comparable (par exemple 80 % de $\dot{V}O_2$ max), présentent une instabilité moins importante de leur métabolisme, puisque pour des variations absolues de $\dot{V}O_2$ et de fréquence cardiaque peu différentes de celles des sujets moins endurants, ils ont une durée d'exercice bien supérieure en moyenne (57 min pour le groupe I et 38 min pour le groupe III).

L'effet d'une température ambiante plus élevée (35°C) ne semble pas modifier, pour l'ensemble des sujets, leur consommation d'oxygène (voir figure n°37); des résultats similaires ont été décrits par certains auteurs (63) (79).

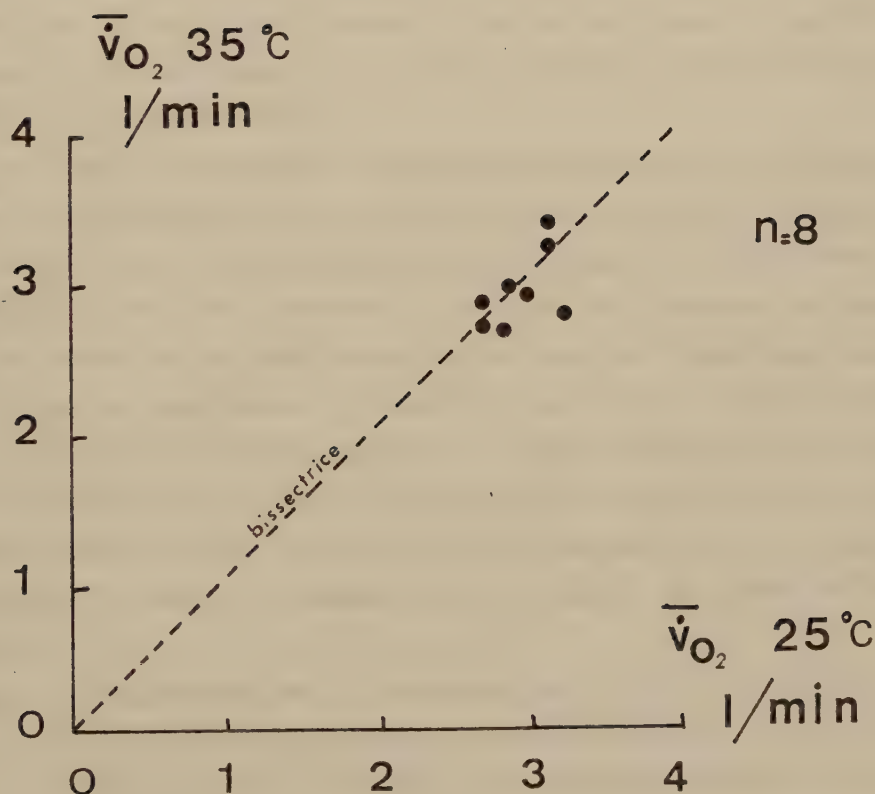


figure n° 37

$\dot{V}O_2$ à 35°C en fonction de $\dot{V}O_2$ à 25°C

- la consommation des substrats énergétiques

. le degré de participation des substrats dans le métabolisme énergétique : il a été estimé grâce à l'évolution du quotient respiratoire (chap.II, p.21). Cependant, ce QR qui a été mesuré au niveau de l'air expiré était supérieur à 1 en cas d'hyperventilation relative (pour les sujets du groupe III), le QR métabolique était alors estimé être égal à 1.

+ protides : les résultats obtenus (chap.III, p.34) montrent que les protides sont très peu utilisés en tant que substrats ; ce fait est bien connu (32).

+ lipides : la diminution de QR avec la durée de l'exercice suggère une augmentation globale de la participation des lipides à la fourniture énergétique, ce qui a déjà été décrit (16) (20). De même, cette consommation de lipides augmente d'autant plus que la puissance relative de l'exercice est plus modérée, en accord avec certains auteurs (16). Un fait important est cependant mis en évidence : les sujets les plus endurants utilisent une part non négligeable de lipides (20 % en moyenne), contrastant avec l'utilisation quasi exclusive des glucides (quelle que soit l'intensité de l'exercice) par les sujets peu endurants. Ce fait a déjà été souligné par plusieurs auteurs ; certains ont mis en évidence un abaissement du cholestérol sérique chez le skieur de fond (39), d'autres ont montré que les sujets très endurants réalisent un équilibre plus efficace des réactions de mobilisation et d'utilisation des corps cétoniques et des acides gras libres (38). L'entraînement créerait un état favorable au niveau tissulaire pour une utilisation accrue des lipides par le muscle (58).

+ glucides : dans cette étude, le glycogène représente le substrat qui a la participation la plus importante dans la fourniture énergétique (80 % pour les sujets endurants et 100 % pour les peu endurants). Il semble en effet que pour des exercices musculaires d'une telle intensité, ce soit le glycogène qui est consommé ; le glucose ne jouant qu'un très faible rôle dans le métabolisme énergétique (1). Cependant, pour des exercices d'intensité plus faible, il est vraisemblable que le glucose joue un rôle non négligeable, et ceci d'autant plus que l'exercice se prolonge (76). La mise au point de techniques permettant les biopsies musculaires chez l'Homme et d'analyser leur contenu en glycogène, a permis d'estimer la quantité de glycogène stockée et consommée dans le muscle au cours de l'exercice (12) (34) (36) (20).

. l'épuisement : l'importance de la consommation du glycogène dans la genèse de l'épuisement est très discutée. Certains auteurs (34) (36) mettent en évidence une diminution très importante des réserves en glycogène musculaire lors de l'épuisement entraîné par un exercice à 75 % de $\dot{V}O_2$ max. Cependant, dans cette étude, si on estime la quantité de glycogène musculaire avant l'exercice en utilisant les taux de concentration en glycogène donnés par certains auteurs (34), il semble, connaissant le poids de glucides consommés, que cette déplétion en glycogène n'est pas suffisante pour expliquer la sensation d'épuisement. Ce fait est

en accord avec les résultats obtenus par des auteurs ayant étudié des sujets travaillant pendant une heure à 80 % de $\dot{V}O_2$ max (20). Il faut toutefois signaler pour les biopsies musculaires l'existence d'un délai de prélèvement après l'exercice susceptible de modifier les concentrations en glycogène musculaire.

Pour certains auteurs, l'épuisement coïncide avec la chute de la glycémie (16) (61), ce qui n'est pas le cas dans cette étude puisqu'il n'y a pas de variation significative de la glycémie lors de l'épuisement. Ceci est en accord avec d'autres auteurs (34) (36) qui ont observé une glycémie supérieure à 0,80 g/l lors de l'épuisement chez des sujets travaillant à 80 % de $\dot{V}O_2$ max ; ce qui suggère une augmentation du transport de glucose depuis le foie jusqu'aux muscles en activité.

Il paraît donc vraisemblable que les diminutions de la glycémie et des réserves en glycogène ne jouent pas obligatoirement un rôle important dans la genèse de l'épuisement. Il faut tenir compte des modifications de température (27), de pH (51) et d'hydratation qui sont susceptibles d'altérer la possibilité d'utilisation des substrats par la cellule musculaire.

b) la production d'eau métabolique

Connaissant la quantité moyenne d'eau apparue lors de l'utilisation de 1 g de glycogène, de lipides et de protides (13), ainsi que le poids de ces substrats consommés, il devient alors aisé d'évaluer cette production d'eau métabolique. Les résultats obtenus (chap. III, p. 58) montrent qu'à 25°C, cette production d'eau n'est pas négligeable puisqu'elle est du même ordre de grandeur que les pertes.

Des auteurs ont estimé cette production d'eau au cours de l'exercice (7) (42) (13). Certains pensent que lors d'un exercice d'intensité submaximale, la quantité d'eau libérée est proche de 800 ml, ce qui représente la moitié de la quantité d'eau nécessaire à l'évaporation de la chaleur produite par l'exercice (7). D'autres estiment cette production à plus de 1100 ml, lors d'un exercice à 75 % de $\dot{V}O_2$ max prolongé jusqu'à l'épuisement (42).

Dans cette étude, la production hydrique est plus importante pour les sujets du groupe I (environ 15 g/min) que pour les sujets du groupe III (12,5 g/min), sans que cela soit significatif. L'eau liée au glycogène est de loin la source la plus importante de cette production (80 %) par rapport à la glycolyse (17 %). Quant à la lipolyse, qui est très faible chez les sujets du groupe III, elle fournit seulement 3 à 4 % de l'eau produite chez les sujets des groupes I et II ; cela s'explique par le fait que l'utilisation de 1 g de lipides libère presque 3 fois moins d'eau que celle de 1 g de glycogène, les sujets très endurants diminuent de ce fait leur production hydrique.

L'effet d'une température ambiante plus élevée (35°C) ne modifie pas la production d'eau métabolique (environ 12,30 g/min à 25°C et 11,30 g/min à 35°C).

4) Le bilan hydrique et l'importance de la rétention d'eau dans le secteur extravasculaire comme facteur limitant l'aptitude à l'endurance

a) le bilan hydrique

Ce bilan correspond à la différence existant entre les productions et les pertes d'eau obtenue pour chaque sujet lors de ce travail. S'il apparaît à 25°C que les sujets des groupes I et II présentent en moyenne un déficit hydrique peu important (respectivement $0,34 \pm 7,60$ g/min et $2,59 \pm 2,90$ g/min), en revanche les sujets du groupe III produisent plus d'eau qu'ils n'en perdent et ont de ce fait un bilan positif ($1,63 \pm 1,06$ g/min), ce qui est tout à fait en opposition avec l'intensité de la déshydratation estimée par certains auteurs à partir des seules pertes sensibles (21) (60) (46).

Le déficit hydrique peu important observé pour les 5 sujets du groupe I est dû au fait que 2 sujets (DUM) et (SAV) travaillant avec une intensité submaximale (95 et 97 % de $\dot{V}O_2$ max), ne consomment que des glucides et produisent en conséquence plus d'eau qu'ils n'en perdent, comme les sujets du groupe III.

L'absence de corrélation entre ce bilan hydrique et la perte de poids corporelle (chap. III, p.60) indique que celle-ci ne peut donc être utilisée pour évaluer le déficit hydrique. En conséquence, il semble indispensable, pour estimer valablement l'état de déshydratation dû aux exercices intenses et prolongés, d'évaluer la production d'eau métabolique.

L'effet d'une température ambiante élevée (35°C) provoque un déficit hydrique plus marqué en moyenne ($3,81 \pm 3,45$ g/min) qu'à 25°C, en rapport avec l'importance de la sudation. Cependant, ce déficit est variable selon l'aptitude à l'endurance des sujets. Comme à 25°C, la participation des lipides à la fourniture énergétique, pour les sujets les plus endurants, entraîne une production d'eau métabolique moins importante, et de ce fait un déficit hydrique plus accentué que celui des sujets peu aptes. Le débit sudoral très élevé observé à 35°C explique la meilleure corrélation ($r = 0,80$) obtenue sous cette température entre la perte de poids corporelle et le bilan hydrique.

b) la rétention d'eau dans le secteur extravasculaire

Si on compare à 25°C le bilan hydrique avec l'estimation du déficit plasmatique ramené à la minute (figure n°23, p.62), il apparaît une rétention d'eau dans le secteur extravasculaire beaucoup plus importante pour les sujets du groupe III que pour les sujets des groupes I et II. Il existe cependant une

forte variabilité individuelle (figure n°24,p.62) : les sujets endurants ont une faible variabilité du déficit plasmatique, alors que leur bilan hydrique est très variable ; les sujets peu endurants ont une importante variabilité du déficit plasmatique pour une variabilité du déficit hydrique plus faible.

L'importance de la rétention d'eau dans le secteur extravasculaire et probablement intracellulaire pour les sujets les moins aptes, est vraisemblablement en relation avec la prédominance du catabolisme glycogénique générateur d'acide lactique dont le pouvoir osmotique contrarie le transfert hydrique vers le secteur plasmatique (13).

La figure n°38 représente la lactatémie après l'exercice, en fonction de la consommation de glycogène par minute. Bien que la lactatémie ne soit qu'un reflet en déphasage et quantitativement inférieur de la production cellulaire de lactate, elle apparaît en moyenne d'autant plus élevée que le sujet est moins endurant et que sa consommation de glycogène est élevée.

A 35°C, la rétention d'eau moins importante dans le système extravasculaire (figure n°32, p.82), peut s'expliquer par l'importance de la déperdition hydrique d'origine sudorale et ce sont toujours les sujets les moins aptes qui présentent les rétentions d'eau extravasculaire les plus marquées.

Ce fait a déjà été mis en évidence par certains auteurs (41), qui ont étudié sur le rat l'effet de l'entraînement à l'exercice musculaire prolongé jusqu'à l'épuisement. Il existe chez le rat entraîné un passage d'eau du milieu intracellulaire au milieu extracellulaire, alors que ce passage se produit en sens inverse chez le rat non entraîné, celui-ci présentant par ailleurs des performances très inférieures.

Au terme de cette étude, il semble que la qualité des transferts hydriques des cellules au travail vers le milieu extérieur, puisse être l'un des facteurs importants de l'aptitude à réaliser un exercice musculaire intense et prolongé. Ces transferts, qui accompagnent ceux des ions H^+ et des calories hors de la cellule, interviennent peut-être avec ces mêmes déchets comme facteurs de perturbation du métabolisme énergétique, lorsqu'une mauvaise adaptation cellulaire et membranaire en limite l'intensité.

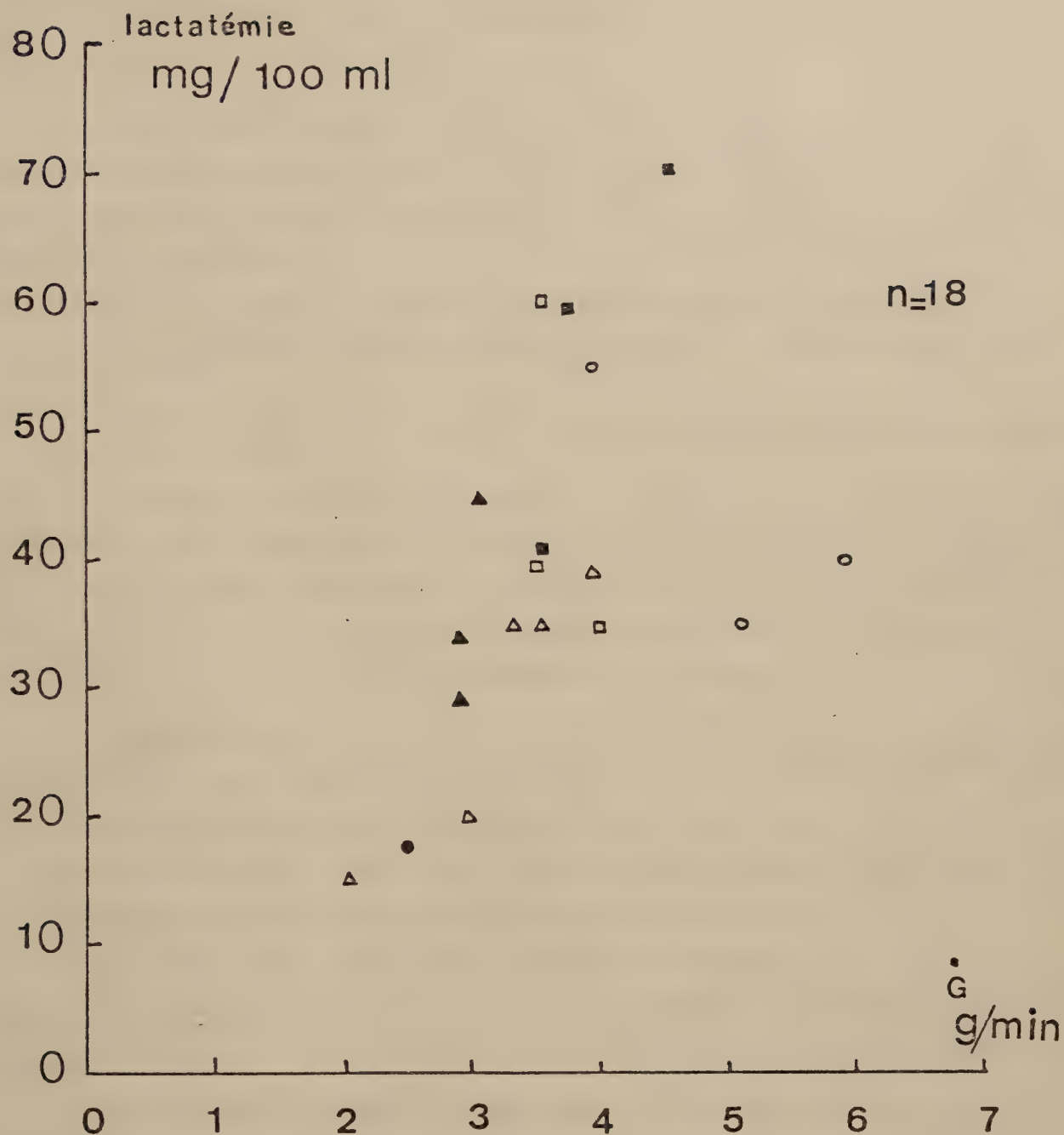


figure n° 38

Lactatémie en fin d'exercice en fonction de la consommation
de glycogène (g/min) à 25°C et à 35°C

25°C 35°C

- ● : sujets très endurants
- △ ▲ : sujets moyennement endurants
- ■ : sujets peu endurants

CONCLUSIONS

Cette étude a permis de réaliser les bilans énergétique et hydrique grâce à l'évaluation précise, d'une part des échanges de matière et d'énergie entre les milieux intérieur et extérieur, et d'autre part des transformations internes, en considérant :

- l'effet d'un exercice musculaire intense mené jusqu'à l'épuisement sur 3 groupes de sujets d'endurance différente soumis à une même ambiance thermique (25°C).
- un groupe de sujets soumis aux effets de deux ambiances thermiques différentes (25°C et 35°C).

Elle met en évidence l'importance de l'eau dans l'aptitude à l'endurance. En effet, toute modification de l'hydratation de l'organisme peut retentir sur les deux maillons essentiels de l'endurance que sont l'appareil cardiovasculaire (rôle de transport et de distribution de l'énergie) et la cellule musculaire (rôle d'utilisation et de transformation de l'énergie).

Comme le montre ce travail, l'aptitude à l'endurance sous une ambiance thermique confortable (25°C) se caractérise par :

- une importante capacité de thermolyse avec un débit sudoral élevé.
- une participation du métabolisme lipidique à la fourniture énergétique permettant de restreindre la production d'eau métabolique.
- une spoliation moins importante du volume plasmatique.

Ceci aboutit à une faible rétention d'eau dans le milieu extravasculaire (probablement intracellulaire) et à une augmentation plus lente de la fréquence cardiaque.

Les phénomènes inverses se produisent pour les sujets peu endurants, c'est-à-dire un important stockage d'eau dans le milieu extravasculaire et une augmentation plus rapide de la fréquence cardiaque.

Cette aptitude à l'endurance ne peut s'expliquer que par une amélioration importante des systèmes de transferts hydriques, probablement liée à des modifications cytologiques de structure et à une plus grande sensibilité aux hormones du métabolisme hydrominéral.

L'effet d'une ambiance thermique élevée (35°C) consiste en une réduction de l'aptitude à l'endurance avec :

- un débit sudoral nettement augmenté
- une production d'eau métabolique équivalente
- une spoliation peu différente du volume plasmatique.

Ceci aboutit, en dépit d'une réduction importante du stockage hydrique dans le milieu extravasculaire, à une augmentation plus rapide de la fréquence cardiaque, surtout dans la partie terminale de l'exercice.

Quoi qu'il en soit, il apparaît à l'évidence que la perte de poids observée à 25°C est un très mauvais reflet du bilan hydrique et ne peut donc être utilisée pour estimer le déficit hydrique. En conséquence il semble indispensable pour estimer valablement l'état de déshydratation, d'évaluer la production d'eau métabolique due aux exercices intenses et prolongés.

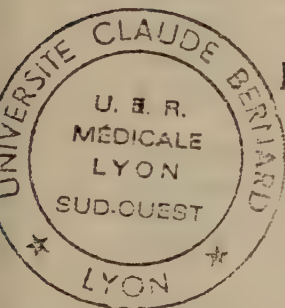
Pour confirmer les résultats obtenus dans ce travail, il serait intéressant d'étudier chez des sujets peu entraînés l'effet de la pratique régulière d'un exercice musculaire prolongé sur les mouvements hydriques. Cette étude permettrait également d'effectuer une approche du problème concernant les parts respectives du "génétique" ou de "l'acquis" dans l'aptitude à l'endurance.

Le Président de la Thèse
(Nom et Signature)

J.F. CIER

Signature

Vu, le Directeur de l'U.E.R. Sud-Ouest



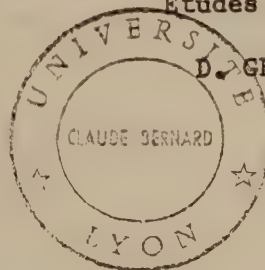
Professeur J. NORMAND

Signature

Vu et Permis d'Imprimer

Lyon, le 29 SEP. 1977

Le Président de l'Université Claude Bernard
Président du Comité de Coordination des
Etudes Médicales



D. GERMAIN

Signature

BIBLIOGRAPHIE

1. AHLBORG B., BERGSTRÖM J., EKELEND L.G. et HULTMAN E.
Muscle glycogen and muscle electrolytes during prolonged physical exercise.
Acta. Physiol. Scand., 1967, 70 , 193-201.
2. ALLEVARD A.M., GEELEN G., ZEBIDI A., GHARIB C. et CIER J.F.
Dosage radioimmunologique de l'hormone antidiurétique dans les urines chez l'homme. Effet d'une charge hydrique et d'une déshydratation.
INSERM. Colloque de synthèse, série Action thématique, 1976, 7 , 97-104.
3. ASMUSSEN E. , CHRISTENSEN E.H. et NIELSEN M.
Aufnahme der Ruhender und der Arbeitenden Skelettmuskeln.
Skand. Arch. Physiol., 1939, 82 , 212.
4. ÅSTRAND I., ÅSTRAND P.O., CHRISTENSEN E.H. et HEDMAN R.
Intermittent muscular work.
Acta. Physiol. Scand., 1960, 48 , 443.
5. ÅSTRAND P.O. et SALTIN B.
Maximal oxygen uptake and heart rate in various types of muscular activity.
J. Appl. Physiol., 1961, 16 , 977.
6. ÅSTRAND P.O. et SALTIN B.
Plasma and red cell volume after prolonged severe exercise.
J. Appl. Physiol., 1964, 19 , 829-832.
7. ÅSTRAND P.O. et RODAHL K.
Manuel de Physiologie de l'exercice musculaire.
Traduit par LACOUR J.R., MASSON et Cie, PARIS, 1973, p. 14, 270, 271 et 481.
8. AURELL M. et VIKGREN P.
Plasma renin activity in supine muscular exercise.
J. Appl. Physiol., 1971, 31 (6), 839-841.
9. BAISSET A. et MONTASTRUC P.
Influence de divers types d'exercices physiques sur l'activité antidiurétique du sérum sanguin chez l'homme. *Med. du Sport*, 1974, 48 , 56-59.
10. BAUM E., BRUCK K. et SCHWENNICK H.P.
Adaptative modifications in the thermoregulatory system of long distance runners.
J. Appl. Physiol., 1976, 40 , 404-410.
11. BENZIGER T.H., KITZINGER C. et PRATT A.W.
The Human Thermostat (HARDY éd.).
"Température : its measurement and control in Science and Industry".
REINHOLD BOOK CORPORATION, NEW YORK, 1963, Vol 3 (3), 637.
12. BERGSTRÖM J., HULTMAN E. et SALTIN B.
Diet, muscle glycogen and physical performance.
Acta. Physiol. Scand., 1967, 71 , 140.
13. BERGSTRÖM J. et HULTMAN E.
Nutrition for maximal sports performance.
J.A.M.A., 1972, 221 (9), 999-1006.

14. BIZOLLON C.A., RIVIERE J.F., FRANCHIMONT P., FAURE A. et CLAUSTRAT B.
A solid phase radioimmunoassay for plasma aldosterone.
Steroids, 1974, 23 , 809-821.
15. CARDUS D., Mc TAGGART W.G., et YOUNG C.L.
Effect of exercise on determination of total body water by tritium oxyde.
J. Appl. Physiol., 1969, 27 (1), 1-3.
16. CHRISTENSEN E.H. et HANSEN O.
Arbeits fähigkeit und Ernährung.
Skand. Arch. Physiol., 1939, 13 , 269.
17. CLARK R.P., MULIAN B.J. et PUGH L.G.C.E.
Skin temperature during running. A study using infra-red colour thermography.
J. Physiol. LONDON, 1977, 267 (1), 53-62.
18. COLLINS K.J. et WEINER J.S.
Endocrinological aspects of exposure to high environmental temperatures.
Physiol. Rev., 1968, 48 , 785-839.
19. CONTE J.J. et BAYARD F.
Le système rénine-angiotensine-aldostérone.
Rev. Med. TOULOUSE, 1976, 12 , 47-78.
20. COSTILL D.L., SPARKS K., GREGOR R. et TURNER C.
Muscle glycogen utilization during exhaustive running.
J. Appl. Physiol., 1971, 31 (3), 353-356.
21. COSTILL D.L. et FINK W.J.
Plasma volume changes following exercise and thermal dehydration.
J. Appl. Physiol., 1974, 37 (4), 521-525.
22. CRAIG F.N. et FROEHLICH M.L.
Endurance of prehead men in exhaustive work.
J. Appl. Physiol., 1968, 24 , 636-639.
23. ECLACHE J.P.
Action de la Noradrénaline sur le contrôle chémoréflexe de la ventilation
pulmonaire chez l'homme.
Mémoire D.E.R.B.H., LYON 1977.
24. FLANDROIS R., LACOUR J.R. et ECLACHE J.P.
Control of respiration in exercising dog : interaction of chemical and physical humoral stimuli.
Respiration Physiology, 1974, 21 , 169-181.
25. FLANDROIS R., HENANE R., BITTEL J., et CHARBONNIER J.P.
Aptitude physique et tolérance à la chaleur chez des athlètes et des sujets non entraînés.
Travaux Scientifiques CRSSA, Effets biologiques des agressions, 1976, 10-14.
26. GHARIB C., BERTHELON A., SASSARD J. et DUTRUGE J.
Le dosage biologique de l'hormone antidiurétique
87^{eme} Congr. Assoc. franç. pour l'avancement des Sciences.
THOMAS éd., NANCY, 1968.
27. GOLLNICK P.O., ARMSTRONG R.B., SAUBERT C.W., PIEHL K. et SALTIN B.
Enzyme activity and fiber composition in skeletal muscle of untrained and trained men.
J. Appl. Physiol., 1972, 33 , 312-319.

28. GRIMBY G.
Renal clearances during prolonged supine exercise at different loads.
J. Appl. Physiol., 1965, 20 , 1294-1298.
29. HADDY F.J., OVERBECK H.W. et DAUGHERTY R.M.
Peripheral vascular resistance.
Ann. Rev. Med., 1968, 19 , 167-194.
30. HARALAMBIE G.
Changes of serum glycoproteins levels after long-lasting physical exercise.
Clin. Chim. Acta., 1970, 27 , 475-479.
31. HARDY J.D.
Physiology of temperature regulation.
Physiol. Rev., 1961, 41 , 521.
32. HEDMAN R.
The available glycogen in man and the connection between rate of oxygen intake and carbohydrate usage.
Acta. Physiol. Scand. 1957, 40 , 305
33. HENANE R., FLANDROIS R. et CHARBONNIER J.P.
Increase in sweating sensitivity by endurance conditioning in man.
J. Appl. Physiol., à paraître Nov. 77.
34. HERMANSEN L., HULTMAN E. et SALTIN B.
Muscle glycogen during prolonged severe exercise.
Acta. Physiol. Scand., 1967, 71, 129.
35. HOUDAS Y. et COLIN J.
Echanges thermiques et hydriques par les voies respiratoires de l'homme.
Path. Biol., 1966, 14 (3-4), 229-238.
36. HULTMAN E.
Studies on muscle metabolism of glycogen and activ phosphate in man with special reference to exercise and diet.
Scand. J. Clin. Lab. Invest., 1967, 19 (suppl. 94).
37. JENNY M. et VALLOTON
Le cortex surrénalien.
Physiologie humaine (MEYER éd.) 1977, 4 , 335-339.
38. JOHNSON R.H. et WALTON J.L.
Quart. J. Exp. physiol., 1972, 57 , 73.
39. KARVONEN M.J.
Nutrition in Heavy Manual Labour, in G. BLIX éd. 1967.
Almqvist and Wiksells Uppsala, p. 59. " Nutrition and physical activity ".
40. KOLANOWSKI J., PIZARRO M.A., HAUSMAN A. et CRABBE J.
L'influence de l'effort en ambiance chaude sur la sécrétion corticosurrénale.
Ann. Endocrinol., 1971, 32 , 314-322.
41. KÖRGE P. et VIRU A.
Water and electrolyte metabolism in skeletal muscle of exercising rats.
J. Appl. Physiol., 1971, 31 (1), 1-4.
42. KOZLOWSKI S. et SALTIN B.
Effect of sweat loss on body fluids.
J. APLL. Physiol., 1964, 19 , 1119-1124.

43. KOZLOWSKI S., SZCZEPANSKA E. et ZIELINSKI A.
The hypothalamo-hypophyseal antidiuretic system in physical exercises.
Arch. Intern. Physiol. Biochim., 1967, 75 , 218-228.
44. LEGROS J.J. et JUCHNES J.
Influence de l'exercice musculaire sur le taux plasmatique de la neurophysine chez l'homme.
C. R. Soc. Biol., 1972, 168 , 1391-1393.
45. LEGROS J.J.
Les neurophysines. Recherches méthodologiques expérimentales et cliniques.
MASSON éd., PARIS, 1976.
46. MAGAZANICK A., SHAPIRO Y., MEYTES D. et MEYTES I.
Enzyme blood levels and water balance during a marathon race.
J. Appl. Physiol., 1974, 36 (2), 214-217.
47. MILIC-EMELI G., PETIT J.M. et DEROANNE R.
The effects of respiratory rate on the mechanical work of breathing during muscular exercise.
Intern. Z. Angew. Physiol., 1960, 18 , 330.
48. MILLER H. et MOSES A.M.
Radioimmunoassay of urinary antidiuretic hormon with application to the study of the Brattlebro rat.
Endocrinology, 1971, 88 , 1389-1396.
49. MITCHELL J.W., NADEL E.R. et STLOWIJK J.A.J.
Respiratory weight losses during exercise.
J. Appl. Physiol., 1972, 32 (4), 474-476.
50. MONTASTRUC P. et STREICHER M.
Effets de divers types d'exercice physique sur la clearance de l'eau libre.
Méd. du Sport, 1974, 48 (2), 61-71.
51. NAHAS G.G.
Equilibre acidobasique et régulations métaboliques. Actualités de physiologie pathologique.
Régulation de l'équilibre acidobasique, 3^{ème} série.
MASSON éd., PARIS, 1970, 155-167.
52. NIELSEN M.
Die regulation der körpertemperatur bei muskellarbeit.
Skand. Arch. Physiol., 1938, 79 , 193.
53. NIELSEN B.
Regulation of body temperature and heat dissipation at different levels of energy and heat production in man.
Acta. Physiol. Scand., 1966, 68 , 215.
54. OTIS A.B.
The work of breathing (FENN and RAHN éd.)
" Handbook of Physiology ", sec. 3 Respiration.
Am. Physiol. Soc. WASHINGTON D.C., 1964, 1 , 463.
55. PAPPENHEIMER J.R.
Central control of renal circulation.
Physiol. Rev., 1960, 40 , 35.

56. POORTMANS J.R.
Serum protein determination during short exhaustive physical activity.
J. Appl. Physiol., 1970, 30 , 190-192.
57. QUARD S., MALLIET J.P., ECLACHE J.P. et FLANDROIS R.
Capacité aérobie de l'homme normal : étude de la valeur prédictive de différents types d'exercices.
J. Physiol. PARIS, 1970, 62 , 433-434.
58. QUARD S., FLANDROIS R., MEISTER R., ZWINGELSTEIN G., JOUANNETEAU J., PERES G.
Influence de l'entraînement sur la mobilisation des lipides au cours d'exercices submaximaux prolongés.
Méd. du Sport, 1973, 47 (4), 190-192.
59. QUARD S., ECLACHE J.P., et FLANDROIS R.
Aspect technique et intérêt du dosage de l'acide lactique pour le contrôle de l'intensité d'un exercice.
Méd. du Sport, à paraître.
60. ROCKER L., KIRSCH K., MUND U. ET STOBOY H.
The rôle of plasma proteins in the control of plasma volume during exercise and dehydration in long distance runners and cyclists.
" Metabolic adaptation to prolonged physical exercise " (HOWALD et POORTMANS).
1973, 4 (4), 238-244.
61. RODAHL K., MILLER H.L. et ISSEKUTZ B.
Plasma free fatty acids in exercise.
J. Appl. Physiol., 1964, 19 , 489.
62. ROWELL L.B., BLACKMON J.R. et BRUCE R.A.
Indocyanine Green Clearance and estimated hepatic blood flow during mild to maximal exercise in upright man.
J. Clin. Invest., 1964, 43 , 1677.
63. ROWELL L.B., MARX H.J., BRUCE R.A., CONN R.D. et KUSUMI F.
Reduction in cardiac output, central blood volume and stroke volume with thermal stress in normal man during exercise.
J. Clin. Invest., 1966, 45 , 1801-1816.
64. ROWELL L.B.
Human cardiovascular adjustments to exercise and thermal stress.
Physiol. Rev., 1974, 54 (1), 99-102.
65. SALTIN B. et STENBERG J.
Circulatory response to prolonged severe exercise.
J. Appl. Physiol., 1964, 19 , 833-838.
66. SALTIN B. et HERMANSEN L.
Esophageal, rectal and muscle temperature during exercise.
J. Appl. Physiol., 1966, 21 , 1757.
67. SALTIN B. et ÅSTRAND P.O.
Maximal oxygen uptake in athletes.
J. Appl. Physiol., 1967, 23 , 353.
68. SASSARD J., QUARD S., GHARIB C. et LACOUR J.R.
Influence de l'intensité de l'exercice sur les activités rénine et antidiurétique du plasma chez l'homme normal.
J. Physiol., 1970, 62 , 398.

69. SENAY L.C.
Movement of water, protein and crystalloids between vascular and extravascular compartments in heat exposed men during dehydration and following limited relief of dehydration.
J. Physiol. LONDON, 1970, 210 , 617-635.
70. SUNDJORD J.A., STROMME S.B. et AAKVAAG A.
Plasma aldosterone, Plasma renin activity and Cortisol during exercise.
" Metabolic adaptation to prolonged physical exercise " (HOWALD et POORTMANS).
1973, 5 (4), 308-314.
71. Van BEAUMONT W., GREENLEAF J.E. et JUHOS L.
Disproportional changes in hematocrit, plasma volume and proteins during exercise and bed rest.
J. Appl. Physiol., 1972, 33 , 55-61.
72. Van BEAUMONT W.
Red cell volume with changes in plasma osmolarity during maximal exercise.
J. Appl. Physiol., 1973, 35 (1), 47-50.
73. VINCENT M.
Radioimmunosodages de l'angiotensine II et de l'angiotensine I.
Application à la détermination de l'activité rénine du plasma.
Thèse(Doctorat d'Etat en Pharmacie), 1973, 262-264.
74. VOGT J.J., FREUND H., PELLIER A. et MARBACH G.
Analyse des facteurs déterminant les variations lentes de fréquence cardiaque pendant et après l'exercice.
Int. Z. Angew. Physiol., 1971, 29 , 255-284.
75. WADE O.L., COMBES B., CHILDS A.W., WHEFLER H.O., COUNNAND A. et BRADLEY S.E.
The effect of exercise on the splanchnic blood flow and splanchnic blood volume in normal man.
Clin. Sci., 1956, 15 , 457-463.
76. WAHREN J., FELIG P., HENDLER R. et AHLBORG G.
Glucose metabolism during leg exercise in man.
J. Clin. Invest., 1971, 50 , 2715-2725.
77. WEIS FOGH T.
Metabolism and weight economy in migrating animals, particularly birds and insects. In G. BLIX (éd.).
" Nutrition and physical activity ".
Almqvist et Wiksell, Uppsala, 1967, p. 84.
78. WHITE H.L. et ROLF D.
Effects of exercise and of some other influences on the renal circulation in man.
Am. J. Physiol., 1948, 152 , 505-516.
79. WILLIAMS C.G., BREDELL G.A.G., WYNDHAM C.H., STRYDOM N.B., MORRISON J.F.
PETER J., FLEMING P.W. et WARD J.S.
Circulatory and metabolic reactions to work in heat.
J. Appl. Physiol., 1962, 17 , 625.

